

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 博士前期課程		
氏 名	大山 良	学籍番号	1332013
論 文 題 目	帯域分割多偏波CCDに基づく目標高度変化量推定法		
<p>要 旨</p> <p>合成開口レーダ(SAR:Synthetic Aperture Radar)はアンテナから電波を照射し、地表面の散乱係数分布を高分解能に画像化するセンサシステムである。SAR 画像は昼夜・天候を問わず取得可能であり、複素画像であるため位相情報を有する。同位相情報を用いた地表の変化検出技術として CCD(Coherent Change Detection)がある。CCD は観測時期の異なる 2 枚の SAR 画像間の経時変化を局所的な相互相関によって検出する手法で、波長よりも小さい変化を検出することが可能である。また、複数の偏波を用いて観測する多偏波 SAR(Polarimetric SAR)が近年注目されている。PolSAR 画像は単一偏波では得られない目標の形状・構造に関する情報を含んでおり、目標分類・認識に有用である。更に多偏波 SAR 画像を CCD に導入する研究が報告されている。代表的な解析手法として、正準相関分析に基づく変化検出法が提案されている。一般にクロス偏波は受信強度が小さく、雑音の影響を受けやすい。このため、偏波強度に関わらず、多偏波 SAR 画像を解析する同手法では、強度が比較的小さい偏波データの結果に対して特性が大きく依存する。同問題を解決するため、本論文では PolSAR 画像のパウリ分解と SNR による重み付合成に基づく変化検出指標を提案する。X バンドレーダの 1/100 スケールモデル実験データによる性能評価により、従来の手法よりも提案法が検出性能に優れることを示す。</p> <p>一方、災害時の被害状況の把握や迅速な救助活動には、緊急車両の経路選択のために、路面の変化量の情報が必要である。そのため、変化検出と同時に高度変化量推定を行うことが求められる。これに対し、CCD モデルにおける高度変化量推定法が提案されている。同手法は、受信信号の周波数帯域を分割してコヒーレンス関数を計算し、高度変化量推定におけるアンビギュイティの除去と高精度な高度変化推定を同時に実現している。本論文では、同手法を多偏波 SAR 画像に拡張した高度変化量推定法を提案する。パウリ分解を導入し、支配的な散乱成分を抽出することで、より高精度な高度変化量推定を実現する。X バンドレーダの 1/100 スケールモデル実験データによって、提案法の有効性を示す。</p>			

平成26年度修士論文

帯域分割多偏波CCDに基づく目標 高度変化量推定法

学 籍 番 号 1332013

氏 名 大山 良

知能機械工学専攻 電子制御システムコース

指 導 教 員 桐本 哲郎 教授

副指導教員 稲葉 敬之 教授

提 出 日 2015年2月27日

帯域分割多偏波 CCD に基づく目標高度変化量推定法

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	目的	2
第 2 章	合成開口レーダ	3
2.1	合成開口レーダの原理と性質	3
2.2	ポラリメトリック SAR(PolSAR)	8
第 3 章	パウリ分解と重み付けに基づく目標変化検出法	12
3.1	システムモデル	12
3.2	CCD の原理	13
3.3	提案する変化検出指標	15
3.4	実験データを用いた変化検出性能評価	18
3.4.1	実験諸元	18
3.4.2	検出性能の定量評価	20
第 4 章	帯域分割とパウリ分解を用いた高度変化量推定法	30
4.1	システムモデル	30
4.2	従来法の原理	31
4.3	提案法の原理	36
4.4	局所的空間相関に基づく位置合わせ法	40
4.5	実験データを用いた高度変化量推定の性能評価	42
4.5.1	実験諸元	42
4.5.2	高度変化量推定精度の定量評価	43
第 5 章	結論	55
	参考文献	56

第1章 序論

1.1 研究背景

レーダ (RADAR:Radio Detection And Ranging) とはアンテナから電波を照射し、目標からの反射波の到来方向と観測時間を基に目標の探知及び距離計測を行うセンサシステムである。マイクロ波と呼ばれる波長数 cm から数十 cm の電波を送受信に使用することで、昼夜・天候を問わない観測が可能となる。また、使用する周波数によって観測対象を選択できる多様性を持つ。距離分解能はパルス状に放射した電波のパルス幅に左右されるが、パルス圧縮技術の開発により更なる高分解能化が可能となる。レーダを用いた高分解能画像化技術として、合成開口レーダ (SAR:Synthetic Aperture Radar) がある [1]。合成開口レーダは、受信信号に対してパルス圧縮処理・合成開口処理を施すことで、2次元の高分解能画像を得る技術である。合成開口処理は、アンテナ素子を移動させながら取得した受信信号を移動方向に対して合成することで、合成開口長と同じ長さの実開口面を持つアンテナに等しい高分解能を得る技術である。合成開口レーダはレーダ装置を航空機や人工衛星に搭載することで、地球規模のデータを短期間・周期的に観測することが可能となる。そのため、SAR 画像は海洋学や地学、農学や森林学といった幅広い分野に応用される。

SAR 画像は複素画像であるため、位相情報を有する。中でも位相情報は目標までの距離情報等の信号強度では抽出できない有用な情報を有する。SAR 画像の位相情報を利用した技術の一つとして、干渉型合成開口レーダ (InSAR: Interferometric SAR) が挙げられる [2]、[3]。InSAR は時間的、あるいは空間的に異なる同一地域の 2 セット以上の画像を干渉させることで、地表面の高度や地形の変化、移動目標の速度等を計測する技術である。InSAR の原理に基づく変化検出技術として CCD(Coherent Change Detection) がある [4]。CCD は SAR 画像の複素相関に基づく変化検出手法で、観測時期の異なる 2 つの SAR 画像から、コヒーレンス関数と呼ばれる局所的な複素相関係数を求める。同相関係数は波長よりも小さい僅かな変化を検出することが可能であり、様々な拡張がなされている [5]。

また、複数の偏波を送受信で変えて観測する多偏波 SAR(Polarimetric SAR) が近年注目されている [6]、[7]。偏波情報は送受信するマイクロ波の振動方向を表す情報であり、目標の形状に応じてその強度が変化する。さらに、偏波情報

をパウリ分解することで、目標の散乱特性に応じた成分を強調することができる。この様な特徴から、偏波情報は畑や森林、人工物といった地表面の形状の分類や地震や津波などの災害による地形の変化の記述などに応用される。更に多偏波 SAR 画像を CCD に導入する研究が報告されている。代表的な解析手法として、正準相関分析に基づく変化検出法が提案されている [8]。一般にクロス偏波は受信強度が小さく、雑音の影響を受けやすい。このため、偏波強度に関わらず、多偏波 SAR 画像を解析する同手法では、強度が比較的小さい偏波データの結果に対して特性が大きく依存する。

災害時の被害状況の把握や迅速な救助活動のためには、変化検出と同時に高度変化量推定を行うことが望ましい。そのため、CCD モデルを用いて高度変化量を推定する手法が提案されている [9]。同手法は、受信信号の周波数帯域を分割してコヒーレンス関数を計算し、その位相情報を用いて高度変化量の推定を行う。帯域分割によって発生する位相変化の周波数特性を考慮することで、高度変化量推定におけるアンビギュイティの除去と高精度な高度変化推定を同時に実現している。しかし、同手法は単一の偏波成分のみを考慮した手法であるため、目標の形状を表す偏波情報が十分に利用されていないという問題を有する。さらに、同手法の前処理に用いられる位置合わせ手法は、取得された SAR 画像全体を使用して相互相関関数を計算するため、高度変化が SAR 画像中の一部でのみ発生する場合、ずれの推定が不可能である。

1.2 目的

本論文では PolSAR 画像のパウリ分解と SNR による重み付合成に基づく変化検出指標を提案する。SNR に基づく重み付けにより、地表面の散乱特性を考慮した変化検出が実現される。さらに、パウリ分解した帯域分割 SAR 画像からコヒーレンス関数を計算し、その位相情報を用いて高度変化量を推定する手法を提案する。また、高度変化量推定の前処理として行う位置合わせについて、局所的空間相関に基づく位置合わせ手法を提案する。提案法では、目標形状に特徴的なパウリ成分を評価するため、より高精度な高度変化推定量を実現する。X バンドレーダの 1/100 スケールモデルを想定した実験データによって、提案する変化検出指標及び高度変化量推定法の有効性を示す。

第2章 合成開口レーダ

本章では，まず合成開口レーダの原理とその性質を示す．次に SAR の応用技術として，ポラリメトリック SAR(PolSAR) について述べる．

2.1 合成開口レーダの原理と性質

本節では地表面観測の画像レーダ技術として，合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar:SAR) の原理とその処理手順，及び SAR 画像の性質を示す．合成開口レーダは，小型のアンテナを搭載したプラットフォームを移動させながら地表面の観測を行う．送信波には周波数変調をかけたパルス波が用いられ，その照射方向はプラットフォームの進行方向に対し直角である．送信波の照射方向をレンジ方向，プラットフォームの進行方向をアジマス方向と呼ぶ．レンジ方向の分解能は送信波のパルス幅で決定される．パルス幅を小さくすることでレンジ分解能は向上するが，同時に雑音の影響が大きくなる．パルス幅を小さくしたまま雑音の影響を減らすためには，高出力の送信信号が必要となるが，SAR が搭載される環境下では安定した高出力の維持は困難である．したがって，レンジ圧縮と呼ばれる相関処理による高分解能化が不可欠である．また，レンジ圧縮を施した受信信号を，プラットフォームの軌道と目標位置との距離に応じた位相補正をした上で足し合わせることで，アジマス方向の高分解能が実現される．この処理はアジマス圧縮と呼ばれ，合成開口長に等しい開口面を持つ大規模なアンテナで観測を行う場合と同等の高分解能を実現する．以下に実験環境を想定した，ネットワークアナライザを用いた観測における結像処理手順を示す．

図 2.1 の様なモデルについて考える．目標の座標を (x_m, y_m) とすると，各アンテナ位置 $(x_k, 0, z_0)$ から目標までのスラントレンジ距離は

$$R_k(x_m, y_m) = \sqrt{(x_k - x_m)^2 + y_m^2 + z_0^2} \quad (2.1)$$

と表される．送信信号として，次式のような周波数が時間によって線形に変化するチャープパルスを定義する．

$$s(t) = \exp\{j2\pi(f_c + \Delta f n)t\} \quad \left(n = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2}\right) \quad (2.2)$$

ここで f_c は中心周波数， Δf は周波数の刻みを表す．目標に対して (2.2) を照射

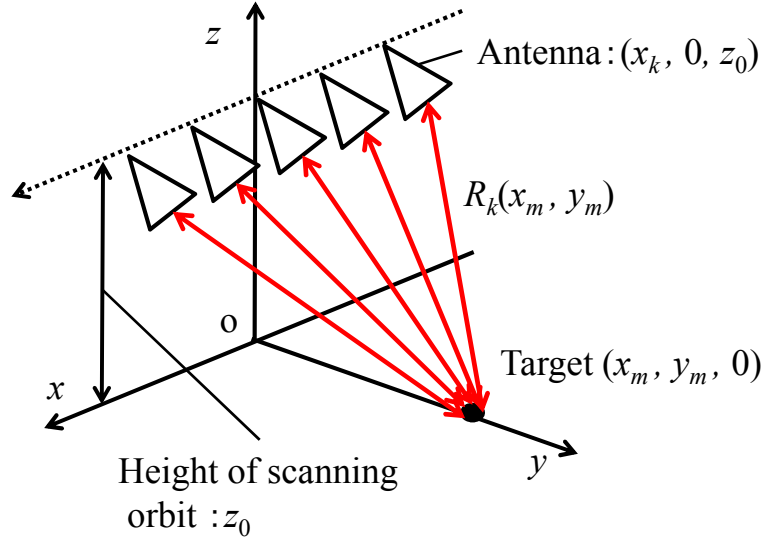


図 2.1: アンテナの走査

した場合の受信信号は, $d_{k,m} = 2R_k(x_m, y_m)/c$ だけ遅れて受信されるため, 受信信号は以下の様に取得される.

$$r(k, t) = \sum_m \sigma_m \exp \left\{ j2\pi (f_c + \Delta f n) \left(t - \frac{2R_k(x_m, y_m)}{c} \right) \right\} \quad (2.3)$$

ここで, σ_m は目標の後方断面積を表す. (2.3) に対し, 同期検波を行った受信信号を次式に示す.

$$\begin{aligned} \alpha(k, n) &= \sum_m \sigma_m \exp \left\{ -j2\pi (f_c + \Delta f n) \frac{2R_k(x_m, y_m)}{c} \right\} \\ &= \sum_m \sigma_m \exp \left\{ -j\frac{4\pi}{\lambda} R_k(x_m, y_m) \right\} \exp \{ -j2\pi (\Delta f n) d_{k,m} \} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで, $\lambda = c/f_c$ は中心周波数に対する波長を表す. 実験環境において, (2.4) が受信信号としてネットワークアナライザから取得される. (2.4) に対して逆フーリエ変換を施す事により, 以下のような時間領域の信号を得る.

$$\begin{aligned} \beta(k, \tau) &= \frac{1}{N+1} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \alpha(k, n) \exp \left\{ j\frac{2\pi}{N+1} (\Delta f n) \tau \right\} \\ &\approx \text{sinc} \left\{ \pi B \left(\frac{\tau}{N+1} - d_{k,m} \right) \right\} \sum_m \sigma_m \exp \left\{ -j\frac{4\pi}{\lambda} R_k(x_m, y_m) \right\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで, B は周波数帯域幅を表す. 以上の処理により, 受信信号 $\alpha(k, n)$ は図

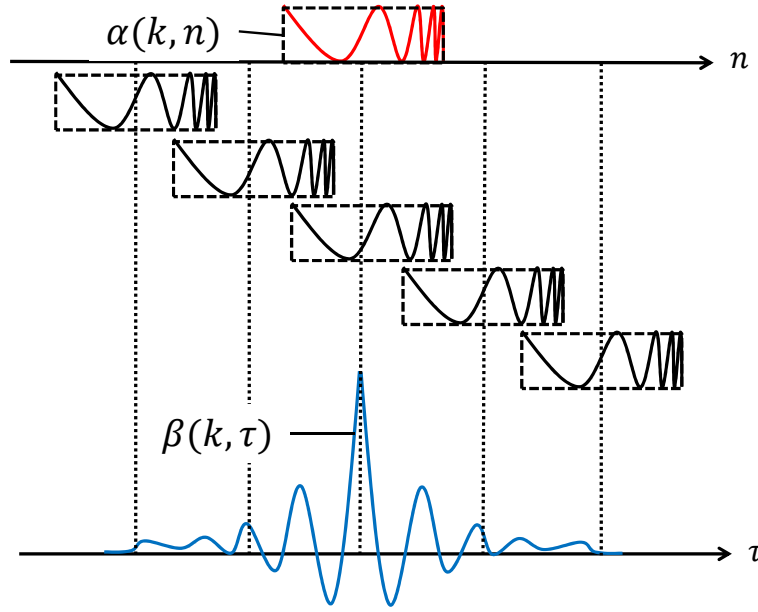


図 2.2: レンジ圧縮

2.2 のような振幅が大きくパルス幅の狭い信号 $\beta(k, \tau)$ に圧縮され，レンジ方向の高分解能が実現される．このときレンジ方向の分解能 ΔY は，次式で定義される．

$$\Delta Y = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad (2.6)$$

次に，(2.5) に対してアジマス圧縮処理を行う．まず，任意の点 (x_I, y_I) について，各アンテナ位置から (x_I, y_I) 間での距離 $R_k(x_I, y_I)$ に対応するデータを (2.5) から抽出する．抽出したデータに対し，次式のように位相補償と積分処理を施す．

$$\begin{aligned} I(x_I, y_I) &= \sum_{k=-K/2}^{K/2} \beta(k, \tau) \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} \{R_k(x_I, y_I) - R_c(y_I)\} \right] \\ &= A(x_I, y_I) \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \{R_k(x_m, y_m) - R_k(x_I, y_I) + R_c(y_I)\} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

ただし， $R_c(y_I) = \sqrt{y_I^2 + z_0^2}$ はアジマスドップラの中心距離を表す．また， $A(x_I, y_I)$ は SAR 画像の強度であり，次式で表される．

$$A(x_I, y_I) = \sum_{k=-K/2}^{K/2} \text{sinc} \left\{ \pi B \left(\frac{\tau}{N+1} - d_{k,m} \right) \right\} \sum_m \sigma_m \quad (2.8)$$

アジマス圧縮処理の模式図を図 2.3 に示す．同処理を画像化範囲のすべての点に対して行うことにより，SAR 画像が再生される．SAR 画像のアジマス方向の

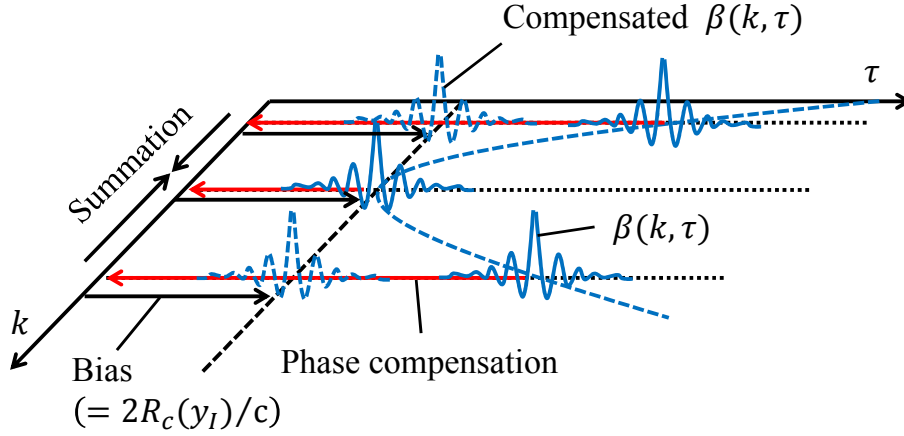


図 2.3: アジマス圧縮

分解能は次式で表される．

$$\begin{aligned}\Delta X &= \frac{\lambda R}{2L_A} \\ &= D_A/2\end{aligned}\tag{2.9}$$

ここで， L_A は合成開口長を， D_A はアンテナの実開口長を表す．この方法は高精度の画像を生成できるが，各画像点で積分を行うため膨大な時間を必要とする．

レーダは可視光よりもはるかに波長の長いマイクロ波を用いるため，雨や雲などを透過する性質を持つ．さらに，自ら信号を送受信するアクティブセンサであるため，昼夜を問わず観測が可能である．SAR 画像は各ピクセルが位相情報を有する複素画像である．また，SAR 画像にはレーダ画像化法特有の現象であるレイオーバという画像位置のずれが生じる．図 2.4 にアンテナから地表面を観測した場合のシステムモデルを示す．同図において， R_A, R_B, R_C はアンテナから A 点，B 点，C 点までのスラントレンジ距離を表す．ここで，A 点及び，B 点に注目する．B 点は A 点よりも h だけ高い位置に存在する．このとき，B 点はその高さの分アンテナに近づくため， $R_A > R_B$ となる．すると，レーダ画像ではスラントレンジ距離に応じた位置に目標が再生されるため，同図下のようになり A 点よりも B 点の手前に表示される．この現象はレイオーバと呼ばれ，目標の高さ h によって SAR 画像中の再生位置が Δr だけ変化する．このとき， Δr と h には次式に示される関係がある．

$$\Delta r = h \cot \theta\tag{2.10}$$

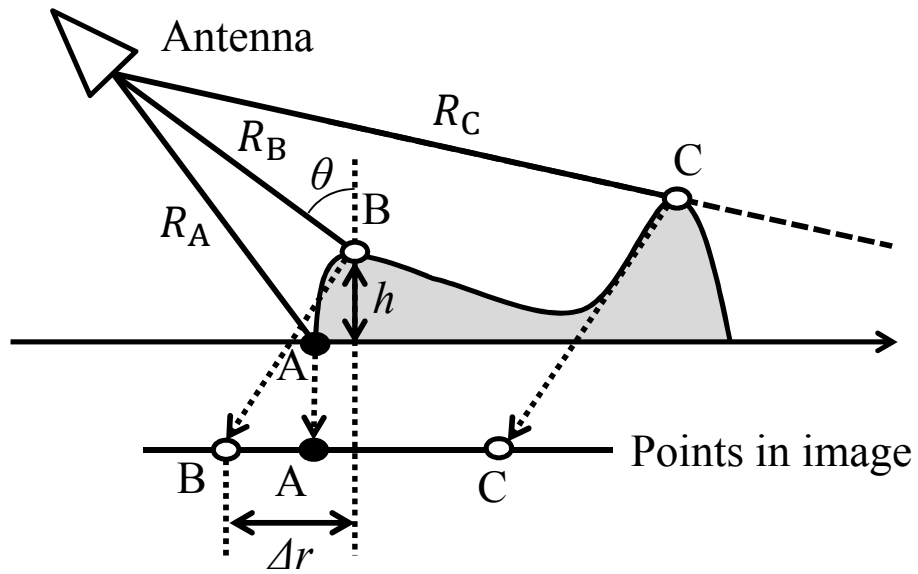


図 2.4: 地表面観測モデル

ただし， θ は送信信号の入射角を表す．次に，C 点に注目する．C 点は B 点と
 違い傾斜が急である．この場合，C 点の背後に観測が不可能な領域が発生する．
 この現象を陰影効果と呼び，素子の観測角に応じて陰影効果の領域は変化する．

2.2 ポラリメトリック SAR(PolSAR)

本節では送受信する信号の偏波情報をセンシングに利用する手法である偏波合成開口レーダ (Polarimetric SAR: PolSAR) と、偏波状態の記述方法の一部を紹介する．偏波とは図 2.5 の様に空間のある定まった位置で、電波を進行方向の後ろから見たときに、時間と共に電界ベクトルの先端が描く軌跡を表している [10]．軌跡の形状には直線や円、楕円といった様々な形が存在し、それぞれが一つの偏波状態に対応する．PolSAR で取得されるデータは電界の先端が直線的に振動する直線偏波の状態で取得される．偏波方向は電界が地面に対して水平になっているものを H(Horizontal) 偏波、それに対して垂直なものを V(Vertical) 偏波として定義されている．従来の SAR では単一の偏波成分のみで送受信した情報を利用するものが多かった．そのため、図 2.6 の様な斜めの線状物体が目標となる場合には、従来のレーダは目標からの反射によって新たに発生する電界ベクトルを無視していた．これに対し PolSAR は、目標からの反射によって発生するすべての電界ベクトルを観測するため、従来のレーダよりも目標形状に関する様々な情報を引き出すことができる．一般に、実環境で観測される目標形状は複雑であるため、ある直線偏波 (H 偏波、または V 偏波) で送信した信号は、目標からの反射により楕円偏波となって返ってくる．反射信号を H 偏波成分と V 偏波成分の両方で受信することにより、次式で表される散乱行列が取得される．

$$S = \begin{bmatrix} s_{HH} & s_{HV} \\ s_{VH} & s_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

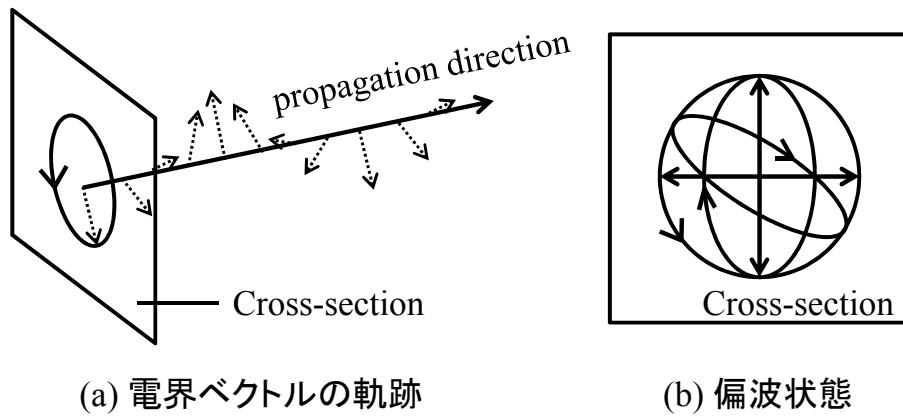


図 2.5: 電界の先端の軌跡

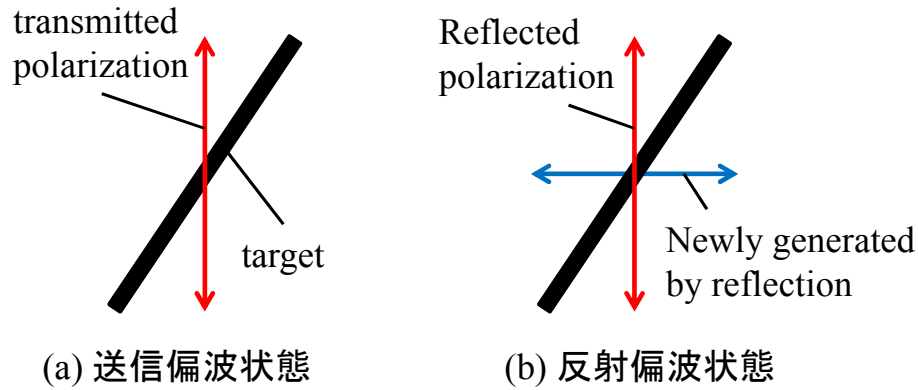


図 2.6: 反射により生じる偏波成分

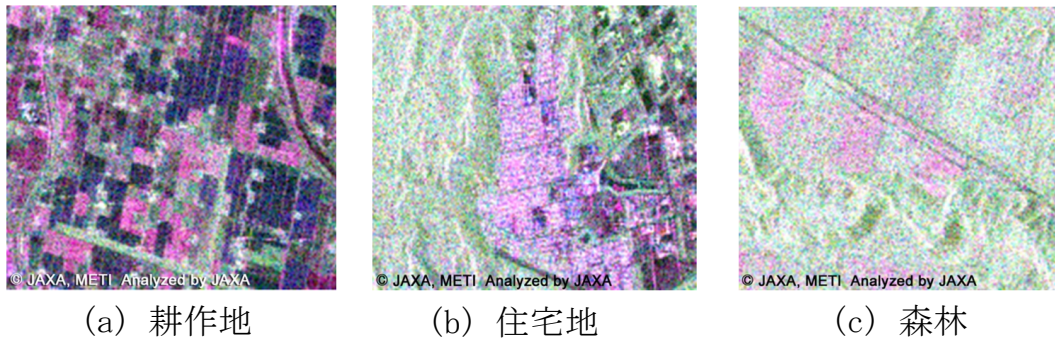


図 2.7: PolSAR 画像 (赤:HH 緑:HV 青:VV)

ただし，各受信信号 s の添え字は順に，受信-送信に使用された偏波成分を表す．散乱行列を解析することにより反射信号の楕円偏波を記述できるため，目標に関する完全なベクトル偏波情報が得られる．同情報は目標の形状に応じて変化するものであるため，PolSAR は土地利用状況の調査 [11] や，作物の作付面積を高精度に計測する研究 [12] などに用いられている．偏波情報を利用した目標識別の一例として，図 2.7 に 3 種類の目標を観測した PolSAR 画像を示す．PolSAR データの表現には HH，HV，VV 偏波で取得した SAR 画像の強度をそれぞれ赤，緑，青の配色で合成した画像が用いられる．同図において，地表面の状態によって，支配的な偏波の分布が変化していることが確認できる．

偏波状態の記述には様々な方法があるが，本稿では 2 種類の散乱ベクトルについて紹介する [10]．多偏波で取得されたデータは (2.11) の様な散乱行列で表されるが，定式化の際にはベクトル表現の方が扱いやすいため，次式で表され

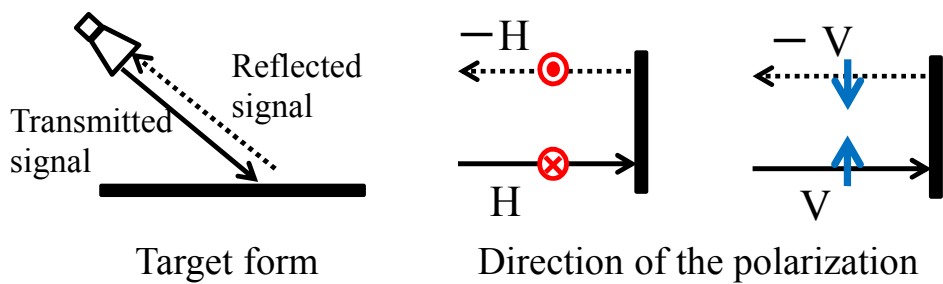
る散乱ベクトルが定義されている．

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} s_{HH} \\ \sqrt{2}s_{HV} \\ s_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

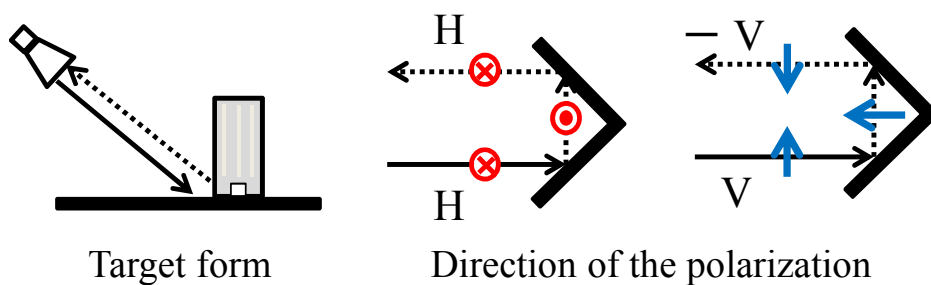
観測をモノスタティックで行うと仮定した場合， $s_{HV} = s_{VH}$ が成り立つため，(2.12) では s_{VH} が省略されている．また，同様な散乱ベクトルとして，パウリ散乱ベクトルが定義されている．同ベクトルは散乱行列とパウリ基底行列の積の Trace となり，次式で定義される．

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} s_{HH} + s_{VV} \\ s_{HH} - s_{VV} \\ 2s_{HV} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

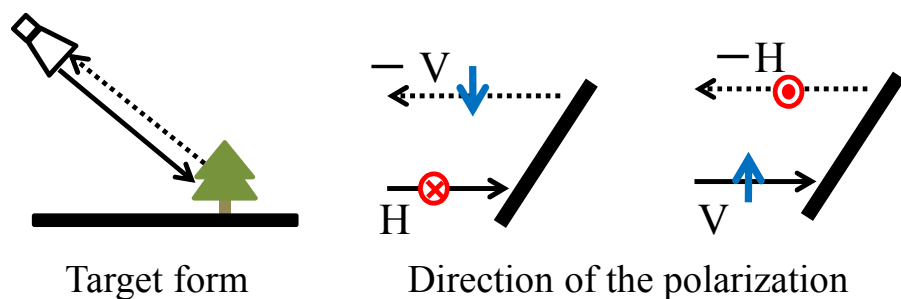
ここで，散乱ベクトル (2.12) と (2.13) はユニタリ変換の関係にある．また，これらのベクトルのノルムは散乱行列 (2.11) の Span と等しくなるため，(2.12) と (2.13)，及び (2.11) の等価性は保証されている．パウリ散乱ベクトルの各成分の強度は地表面の散乱メカニズムに応じて変化する．これは反射波の偏波状態には目標の形状や散乱経路に由来する変化が含まれるためである．図 2.8 に各種目標形状に対する反射波の偏波状態を示す．図 2.8(a) の様な滑らかな地表面による表面散乱では，HH 偏波成分と VV 偏波成分の電界の向きが共に反転する．したがって受信信号 s_{HH} と s_{VV} は加算によって強度が強調され，減算によって減衰するため，(2.13) の第一要素が強調される．一方で，同図 (b) の様な地表面での散乱後に建物や樹幹に反射する二回反射では VV 偏波成分のみ反転し，HH 偏波成分は送信波と同じである．そのため，先程とは反対に加算によって強度が減衰し，減算によって強調されるため，(2.13) の第二要素が強調される．また，同図 (c) の様に樹木の枝葉などのランダムな傾きを持つ物体により発生する散乱は体積散乱と呼ばれる．この場合，図 2.6 の様な送信波とは異なる偏波成分，すなわち HV(または VH) 偏波成分が生じるため，(2.13) の第三要素が強調される．



(a) Surface scattering mechanism



(b) Double scattering mechanism



(c) Volume scattering mechanism

図 2.8: 目標形状による偏波成分の変化

第3章 パウリ分解と重み付けに基づく目標変化検出法

複数 SAR 画像間の経時変化を検出する技術として，CCD(Coherent Change Detection) が近年注目されている [4]．また，多偏波情報を導入した変化検出手法として，CCD に正準相関分析を導入する手法が提案されている [8]．しかし，同手法は低 SNR 環境下において変化検出性能が劣化する問題を有する．同問題に対し，本章ではコヒーレンス関数に対して重み付けしたパウリ散乱ベクトルを導入する手法を提案する．従来法，提案法について，実験データに基づく性能評価を行う．

3.1 システムモデル

図 3.1 の様なモデルについて考える．観測目標は $z = 0$ 平面に存在し，ランダムな凹凸を持つものとする．モノスタティックレーダを仮定し， $y = 0, z = z_0$ においてアンテナを x 軸方向に直線走査する．オフナディア角を θ とする．1 回の観測で，水平 (H)，垂直 (V) 方向の直線偏波を送受信で切り替え，全ての組合せのデータを取得する．送受信信号の伝搬速度は一定であり，真空中の光速 c とする．1 回目の観測後，目標領域の一部の表面形状がわずかに変化すると仮定する．変化後に 2 回目の観測を行う．同ジオメトリは衛星搭載 SAR 及び航空機搭載 SAR を想定している．衛星搭載 SAR の例として，2006 年 1 月に打ち上げられた観測衛星 ALOS に搭載された合成開口レーダ (PALSAR) の緒元を表 3.1 に示す．

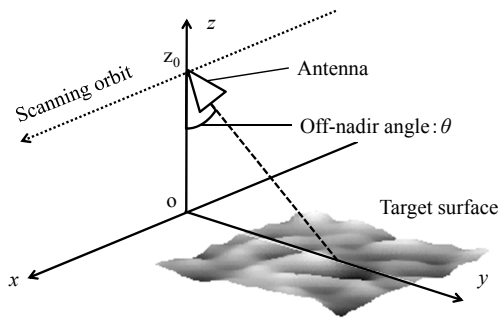


図 3.1: CCD モデル

表 3.1: PALSAR(高分解能モード) 緒元

モード	高分解能モード
中心周波数	1270 MHz(L-band)
バンド幅	28 MHz
高度	691.65 km
オフナディア角	50 °
パルス繰返し周波数	2000 Hz
地上分解能	8 m
観測幅	5 km
アンテナ位置間隔	3.75 km
合成開口長	60 km

3.2 CCD の原理

本節では複数 SAR 画像間の経時変化を高精度に検出する CCD (Coherent Change Detection) について、検出指標であるコヒーレンス関数を示す。さらに、コヒーレンス関数を多偏波に拡張した変化検出法を紹介する。

CCD は変化検出指標としてコヒーレンス関数 (SAR 画像の複素相関係数) を用いて同一領域の微小な経時変化を検出する手法である [4]。異なる時期に観測された 2 つの SAR 画像をそれぞれ $s_1(x', y')$, $s_2(x', y')$ とすると、両画像間のコヒーレンス関数は次式で定義される。

$$\gamma(x, y) = \frac{\iint_{\Omega(x, y)} s_1(x' - x, y' - y) \cdot \{s_2(x' - x, y' - y)\}^* dx' dy'}{\sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} |s_1(x' - x, y' - y)|^2 dx' dy'} \sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} |s_2(x' - x, y' - y)|^2 dx' dy'}} \quad (3.1)$$

ここで、 $\Omega(x, y)$ は相関範囲を表す。図 3.2 にコヒーレンス関数の推定過程を示す。ある画像位置 (x, y) のコヒーレンス関数は、その位置を中心とした相関範囲 $\Omega(x, y)$ 内の画素に対して計算する必要がある。 $\Omega(x, y)$ が小さい場合、空間分解能は高くなるがコヒーレンスの推定精度が劣化する。反対に、 $\Omega(x, y)$ が大きい場合、空間分解能は低下するがコヒーレンスの推定精度が向上する。 $|\gamma(x, y)|$ は $s_1(x', y')$, $s_2(x', y')$ が一致する場合 1 を示し、目標の形状等の変化や観測条件の不一致により $s_1(x, y)$ と $s_2(x, y)$ に差異が生じた場合には 0 に近づく。この性質を利用し、 $|\gamma(x, y)|$ を変化検出指標に用いて SAR 画像の経時変化を検出する。2 回の観測間の変化として、粘土目標の右半面に対して数 mm のタイヤ痕を与えた場合の、CCD による変化検出の例を図 3.3 に示す。画像左半面は $|\gamma(x, y)| \approx 1$ であり、変化がないことを示す。一方右半面はコヒーレンスが低下していることから、変化を検出していることが確認できる。ここで、コヒーレンスの低下要因には、以下に示す熱ノイズによる影響や体積散乱の影響等が挙げられている [13]。

- ρ_{thm} : 熱ノイズによる影響。
- ρ_{reg} : レジストレーション誤差の影響。
- ρ_{plt} : 観測におけるプラットフォーム位置差による影響。
- ρ_{cen} : 中心周波数の差による影響。
- ρ_{vol} : 体積散乱による影響。

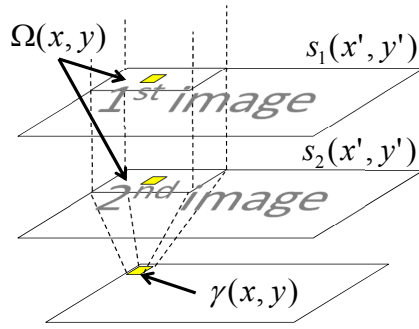


図 3.2: コヒーレンス推定過程

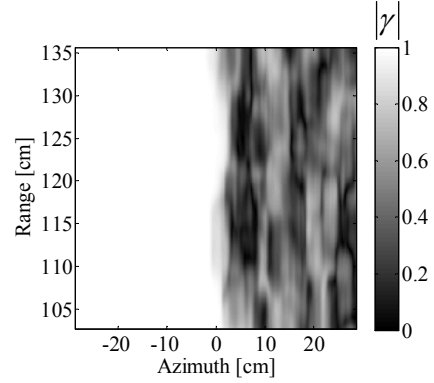


図 3.3: CCD による変化検出の例

- ρ_{tmp} : 時間経過における導電率・誘電率の変化による影響。

上記コヒーレンス関数低下量は積で効果が表れ、コヒーレンス関数の総低下量 ρ_{dec} は次のように示される。

$$\rho_{dec} = \rho_{thm} \rho_{reg} \rho_{plt} \rho_{cen} \rho_{vol} \rho_{tmp} \quad (3.2)$$

式 (3.1) に示したコヒーレンス関数は、単一偏波情報だけしか考慮していない。2.2 節に示した様に、SAR 画像の偏波情報は目標の形状に関する情報を豊富に含む。そのため偏波情報を CCD に導入することで、変化検出性能の向上が期待される。偏波情報を導入した CCD として、最尤推定を用いる手法 [14] や対数尤度を用いる手法 [15] が提案されている。ただし、これらの手法には目標に関する先験情報に基づく確率密度関数が必要となる。先験情報を要しない変化検出法として、正準相関分析を用いた手法が提案されている [8]。正準相関分析は、主に 3 つ以上の変数間の相関関係を分析するために用いられる。今回の場合、変数は各偏波成分に相当する。[8] において、変化検出指標は次式で表される正準相関行列 $X(x, y)$ の最大固有値として定義されている。

$$X(x, y) = K_{11}^{-1}(x, y) K_{12}(x, y) K_{22}^{-1}(x, y) K_{12}^{*T}(x, y) \quad (3.3)$$

ただし、 K_{uv} は (2.12) で定義した散乱ベクトルの積であり、次式で表される。

$$K_{uv}(x, y) = k_u(x, y) k_v^{*T}(x, y) \quad (3.4)$$

ただし、 $u, v = 1, 2$ は観測番号を表す。本手法は各偏波成分を同等に評価している。しかし、一般に HV 偏波は信号強度が小さく雑音による影響を受けやすいため、低 SNR 環境下において本手法は検出性能が劣化する問題を有する。

3.3 提案する変化検出指標

前節で紹介した正準相関分析に基づく変化検出手法の問題を解決するため，本節では偏波情報をパウリ分解し，各成分を SNR で重み付けを行った上でコヒーレンス関数に入力する手法を提案する．

$a(= H, V)$ 偏波を送信し， $b(= H, V)$ 偏波を受信した場合の SAR 画像を $s_{ab,p}$ で表す．ただし， $p(=1,2)$ は観測回の指標を表す．各偏波で取得した SAR 画像により構成される散乱ベクトル \mathbf{X}_p を次式で定義する．

$$\mathbf{X}_p(x, y) = \begin{bmatrix} s_{HH,p}(x, y), & \sqrt{2}s_{HV,p}(x, y), & s_{VV,p}(x, y) \end{bmatrix}^T \quad (3.5)$$

さらに，式 (3.5) をパウリ分解したパウリ散乱ベクトル \mathbf{k}_p は次式で定義される．

$$\mathbf{k}_p(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} s_{HH,p}(x, y) + s_{VV,p}(x, y) \\ s_{HH,p}(x, y) - s_{VV,p}(x, y) \\ 2s_{HV,p}(x, y) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ここで，式 (3.6) の第一要素は表面散乱成分，第二要素は二回反射成分，第三要素は体積散乱成分を表す．提案法では，SNR で重み付けしたパウリベクトルのコヒーレンス関数を計算する．重み付けパウリベクトルを次式で定義する．

$$\mathbf{f}_p(x, y) = \mathbf{w}_p(x, y) \mathbf{k}_p(x, y) \quad (3.7)$$

ここで， $\mathbf{w}_p(x, y)$ は SNR に基づく重み付け行列を表し，次式で定義される．

$$\mathbf{w}_p(x, y) = \frac{\text{diag}(\text{SNR}_{p,1}(x, y), \text{SNR}_{p,2}(x, y), \text{SNR}_{p,3}(x, y))}{\sum_{r=1}^3 \text{SNR}_{p,r}(x, y)}, \quad (3.8)$$

ただし， $r(= 1, 2, 3)$ は \mathbf{k}_p の行番号を表す．重み付けパウリベクトル $\mathbf{f}_p(x, y)$ に対して，次式の変化検出指標を定義する．

$$\gamma_{\text{pro}}(x, y) = \frac{\iint_{\Omega(x, y)} \{\mathbf{f}_1(x' - x, y' - y)\}^{*T} \cdot \mathbf{f}_2(x' - x, y' - y) dx' dy'}{\sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} \|\mathbf{f}_1(x' - x, y' - y)\|^2 dx' dy'} \sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} \|\mathbf{f}_2(x' - x, y' - y)\|^2 dx' dy'}}. \quad (3.9)$$

ここで， $\Omega(x, y)$ は相関範囲を表す．また，式 (3.8) における $\text{SNR}_{p,r}(x, y)$ はコ

ヒーレンス推定の相関範囲内における k_p の第 r 成分の平均電力と雑音領域の平均電力の比であり，次式で定義される．

$$\text{SNR}_{p,r}(x, y) = \frac{E[|k_{p,r}|^2]}{E[|n_{p,r}|^2]} \quad (3.10)$$

ここで， $n_{p,r}$ はパウリベクトルの第 r 要素の雑音を表す．同指標により，観測雑音に対してロバストな変化検出が実現できる．提案法の処理手順は以下のようになる．

- 手順 1) 多偏波 SAR 画像から変化前後のパウリ散乱ベクトル $k_1(x, y)$, $k_2(x, y)$ を生成する．
 - 手順 2) 生成したパウリ散乱ベクトルの各要素の SNR を基に，重み付けベクトル $w_1(x, y)$, $w_2(x, y)$ を計算する．
 - 手順 3) 提案法検出指標 $\gamma_{\text{pro}}(x, y)$ を式 (3.12) で求める．
 - 手順 4) 領域 (x, y) において， $\gamma_{\text{pro}}(x, y)$ が閾値 γ_0 を下回る場合， (x, y) を変化領域とする． γ_0 を上回る場合には (x, y) を無変化領域とする．
- 本手法のフローチャートを図 3.4 に示す．

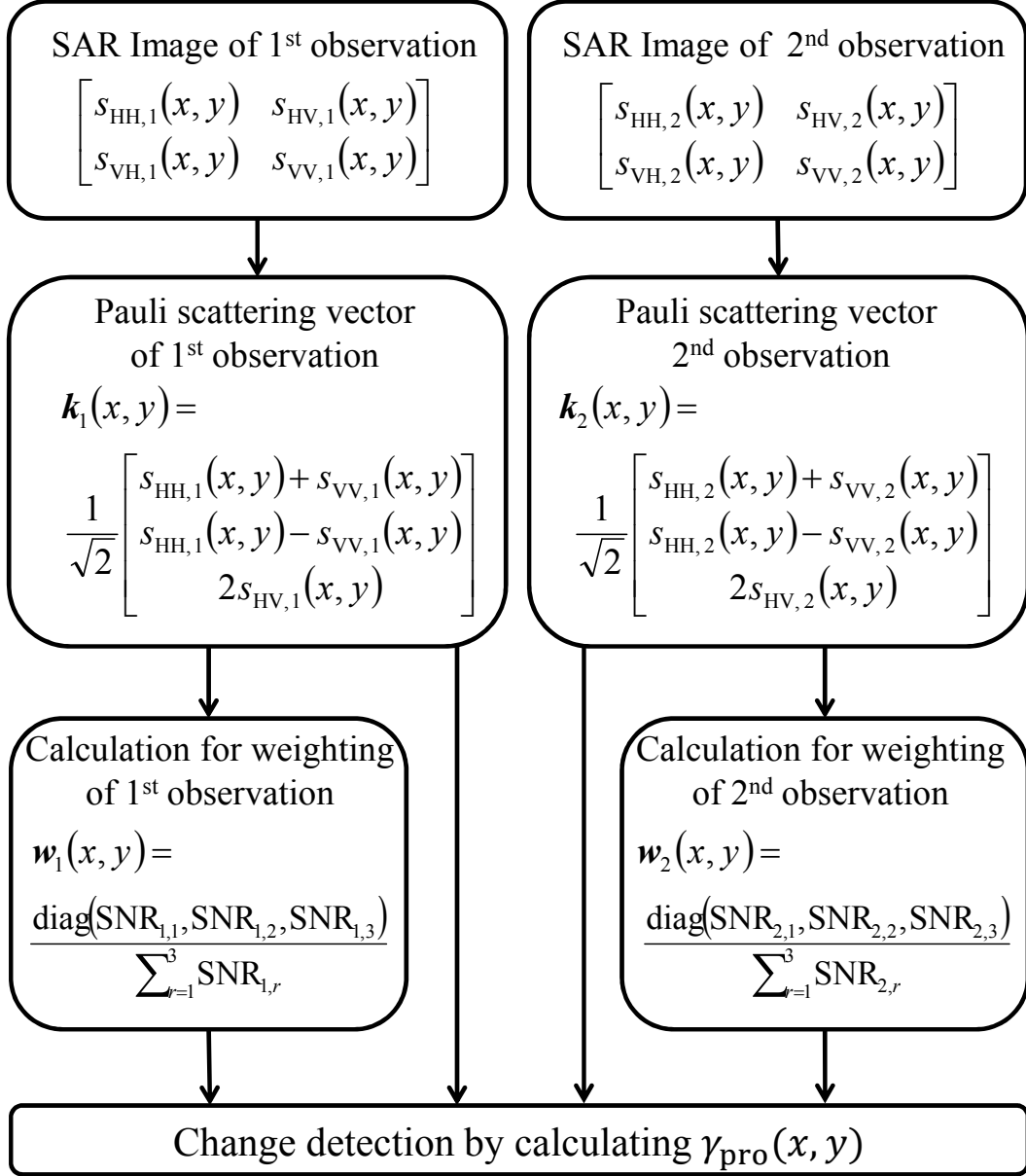


図 3.4: 提案法フローチャート

3.4 実験データを用いた変化検出性能評価

本節では従来法，提案法，及び各種比較用手法について，実験データに基づく性能評価を行う．

3.4.1 実験諸元

レーダ信号取得のための実験緒元を示す．本実験はXバンドレーダを想定し，中心周波数以外の緒元を1/100スケールモデルとして性能評価を行う．図3.5に実験システムの外観を示す．電波暗室内で観測を行う．送信信号の生成及び受信信号の取得にはベクトルネットワークアナライザを用いる．ただし，送信側では20dBの増幅器を介する．観測目標として地表面を模した同じ大きさの2つの粘土目標を設置する．粘土目標1つあたりの大きさを幅40cm，奥行き50cm，高さ10cmとする．二つの粘土目標を x 軸方向に並べる．目標表面には±約1mmの凹凸を与える．送受信アンテナを $-800\text{ mm} \leq x \leq 800\text{ mm}$, $y = 0\text{ mm}$, $z_0 = 900\text{ mm}$ で直線走査する．合成開口点数を200点とする．オフナディア角 $\theta = 50^\circ$ とする．掃引周波数範囲を26 GHzから40 GHzとする．2回の観測間の変化として，図3.6の様に $x \geq 0$ 側の粘土目標に±約2mm程度のタイヤ痕を与える．CCDにおける相関範囲をSAR画像分解能の3倍とする．本実験におけるレンジ方向，アジマス方向の分解能はそれぞれ約14.0 mm，12.5mmとなる．

観測信号に逆フーリエ変換処理を施すことにより，図3.7に示されるレンジ

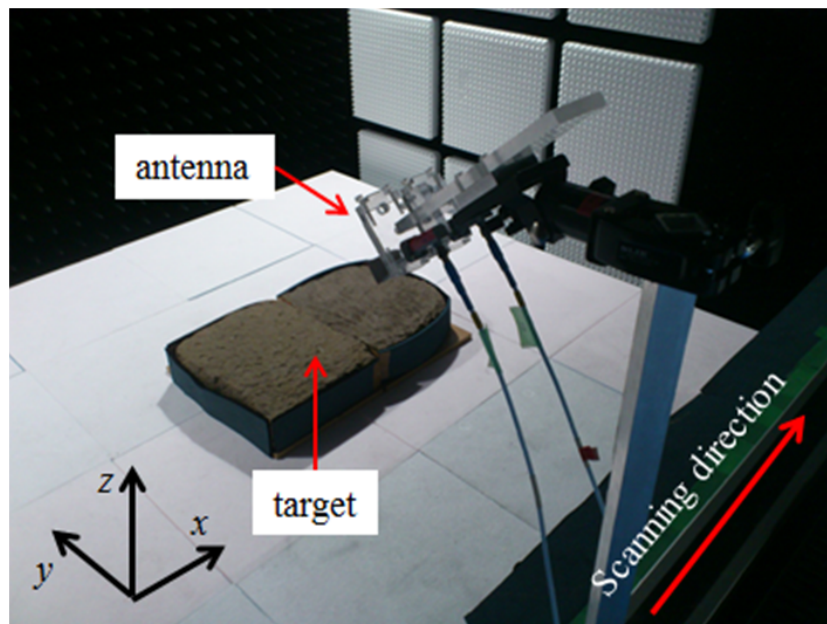


図 3.5: 実験システム外観

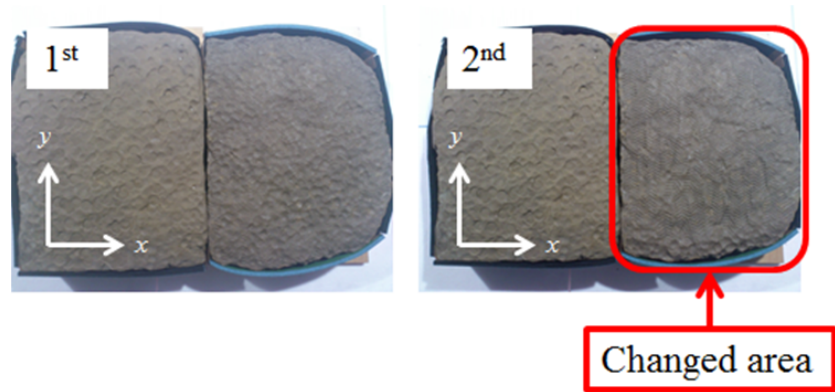


図 3.6: 粘土目標 (左：変化前，右：変化後)

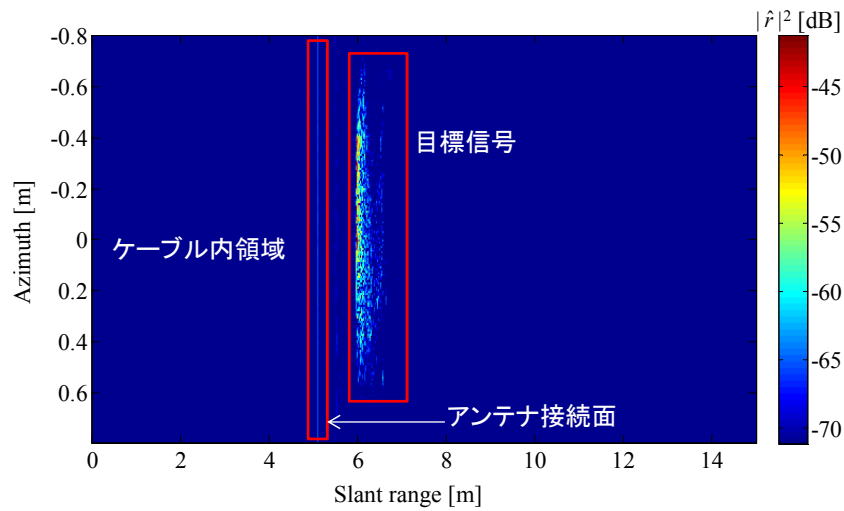


図 3.7: レンジプロフィール

プロフィールが取得される．縦軸はアンテナ走査時のアジマス位置，横軸はスラントレンジ距離を表す．このとき，スラントレンジ距離はネットワークアナライザのコネクタ部分を基準とするため，レンジプロフィールの先頭はケーブル内の反射強度を意味する．同ケーブル内領域に対し合成開口処理を施して取得した SAR 画像の電力を，3.3 節の式 (3.10) における雑音電力 $E[|n_{p,r}|^2]$ として定義する．アジマス圧縮処理を行う前に，アンテナ開口面がレンジプロフィールの先頭となるようケーブル長の補正を行う．ケーブル長の計測には，送受信アンテナを接合させて取得したデータを用いる．このとき，アンテナ接合面ではインピーダンス不整合により反射が生じる．これはレンジプロフィール上に一定距離，一定強度で現れるため，凡そのケーブル長を測ることができる．

3.4.2 検出性能の定量評価

本項では実験データを用いた変化検出結果を示す．ネットワークアナライザの送信電力を変更して，3種類のSNRにおける変化検出結果を示す．表3.2に各偏波・パウリ要素のSNRを示す．ただし，SNR1，SNR2, SNR3の順に送信電力は小さくなる．また，それぞれのSNRは次式で定義される．

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{P_S}{P_N} \quad (3.11)$$

ただし， P_S , P_N はそれぞれ SAR 画像の最大電力，雑音領域の平均電力を示す．

図3.8～3.13に，SNRが一番高い場合の各偏波・パウリ要素のみを用いた変化検出結果を示す．また，図3.14に3.2節に示した正準相関分析に基づく変化検出結果を，図3.15に提案法による変化検出結果を示す．いずれの結果も右反面の変化を検出しており，手法による違いは見られない．そこで，各手法に対し，ROC(Receiver Operating Characteristic) 評価を行った結果を図3.16に示す．ここで，横軸は誤警報確率 P_{FA} (変化を与えない部分を変化したと判断する確率) を，縦軸は検出確率 P_D (変化を与えた部分を変化したと判断した確率) をそれぞれ表す．また，各偏波のROC曲線を黒色(HH:一点鎖線，HV:点線，VV:実線)で，各パウリ要素のROC曲線を緑色(第一要素:実線，第二要素:一点鎖線，第三要素:点線)で，従来法を青実線で，提案法を赤実線でそれぞれ表す．VV偏波，パウリベクトルの第一要素は提案法に隠れて見えないが，いずれの P_{FA} に対しても P_D が1となっているため，変化を完全に検出している．また，パウリベクトルの第三要素はHV偏波と完全に一致する．これは，第三要素はHV偏波の $\sqrt{2}$ 倍であり，両者の位相は変化しないためである．また，第二要素が他と比較して精度が落ちているが，これはHH偏波とVV偏波の減算により，信

表 3.2: 各偏波・パウリ要素のSNR

偏波・要素	SNR1[dB]	SNR2[dB]	SNR3[dB]
HH 偏波	41	34	24
HV 偏波	20	11	7
VV 偏波	42	33	23
パウリベクトル第一要素	45	36	27
パウリベクトル第二要素	30	22	13
パウリベクトル第三要素	20	11	7

号強度が落ち，SNR が劣化したためであると考えられる．

次に，SNR が二番目に高い場合の変化検出結果を図 3.17～3.24 に示す．先ほどの場合と比較すると，HV 偏波 (=第三要素) だけが左反面も変化したと判断している．図 3.25 に ROC 評価を行った結果を示す．図 3.16 と比較すると全体的に劣化があるものの，HV 偏波だけが一際大きく劣化していることが確認できる．これは今回使用した目標が，体積散乱が発生しにくい目標であるため，SNR の低下の影響が最も顕著に表れた結果であると考えられる．一方で，この SNR の場合においても提案法，VV 偏波，第一要素は変化を完全に検出していることが確認できる．

最後に，SNR が最も低い場合の変化検出結果を図 3.26～3.33 に示す．いずれの手法についても画像左半面の値が 0 に近づいており，検出性能の劣化が確認できる．このときの ROC 評価を図 3.34 に示す．これまでの場合と比較すると，ROC 曲線の分布が大きく変化していることが確認できる．また，従来法に注目すると，検出確率が大幅に劣化していることが確認できる．これは，従来法がすべての偏波成分を等価に評価しているため，HV 偏波の大幅な劣化の影響を受けた結果であると考えられる．一方で，提案法はほとんどの P_{FA} に対し，検出確率が最も高くなっていることが確認できる．これは，提案法が SNR に基づく重み付けを行うことにより，検出確率の低い第二要素，第三要素の影響を大幅に抑制しているためと考えられる．

次に，提案法におけるパウリ分解，重み付けの有効性を調査するため，以下のような場合について考える．

- (a) パウリ分解を行わない場合．具体的には k_p の代わりに，式 (3.5) で表される X_p を用いる場合．
- (b) 重み付けを行わない場合．具体的には w_p が $p = 1, 2$ において単位行列となる場合を考える．
- (c) パウリ分解も重み付けも行わない場合．具体的には k_p の代わりに X_p を用い， w_p が単位行列となる場合を考える．

SNR が最も低い場合について，(a)，(b)，(c) の変化検出結果を図 3.35～図 3.37 に，ROC 評価を図 3.38 に示す．ただし，赤実線は提案法，黒実線は (a)，赤点線は (b)，黒点線は (c) をそれぞれ表す．図 3.38 において，重み付けを行わない (b) と (c) の検出確率が一致していることが確認できる．これは， w_p を単位行列として変化検出指標を展開した場合，(b)，(c) はともに以下の形になるため

ある．

$$\gamma(x, y) = \frac{\iint_{\Omega(x, y)} \{ \mathbf{X}_1(x' - x, y' - y) \}^{*T} \cdot \mathbf{X}_2(x' - x, y' - y) dx' dy'}{\sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} \| \mathbf{X}_1(x' - x, y' - y) \|^2 dx' dy'} \sqrt{\iint_{\Omega(x, y)} \| \mathbf{X}_2(x' - x, y' - y) \|^2 dx' dy'}} \quad (3.12)$$

また，同図より提案法が (a) を完全に上回ることが確認できる．この原因は以下のように考えられる．今回の目標は表面散乱が支配的な目標である．そのため，ほぼすべてのピクセルにおいてパウリベクトルの第一要素の強度が強調されて SNR が向上し，それに応じて重みが大きくなる．反対に，パウリベクトルの第二要素，第三要素は強度が小さくなるため SNR が劣化し，それに伴い重みが小さくなる．その結果，提案法はパウリベクトルの三つの要素のうち，雑音に対し耐性がある第一要素のみを用いる場合とほぼ等価になるため，検出確率が向上する．一方で， \mathbf{X}_p の各要素の SNR はパウリベクトルの第一要素ほど高くはなく，各要素毎の SNR の差もパウリベクトルと比較すると小さい．そのため提案法と比較して，雑音に対し耐性のない要素の影響が大きくなるため，(a) は提案法に劣ると考えられる．したがって，提案法におけるパウリ分解と SNR に基づく重み付けの導入は有意義であり，どちらも必要不可欠である．

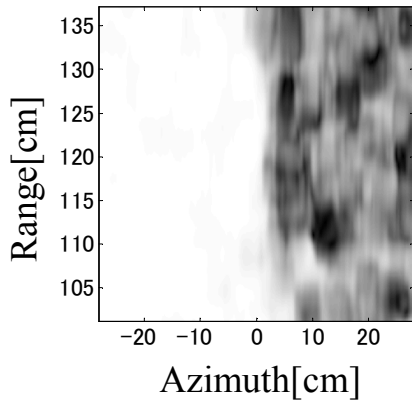


図 3.8: HH 偏波におけるコヒーレンスマップ

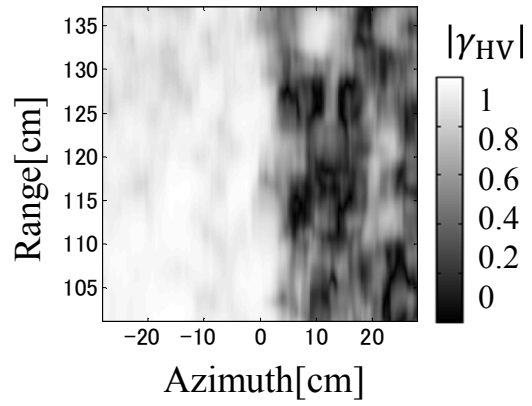


図 3.9: HV 偏波におけるコヒーレンスマップ

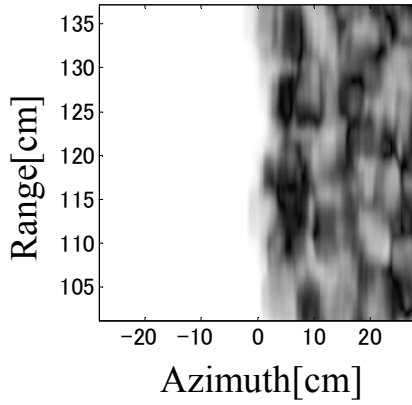


図 3.10: VV 偏波におけるコヒーレンスマップ

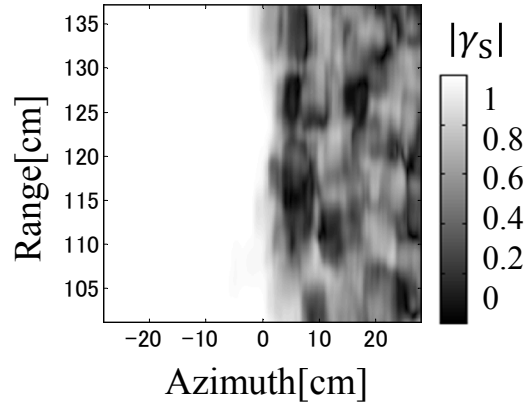


図 3.11: パウリベクトルの第一要素におけるコヒーレンスマップ

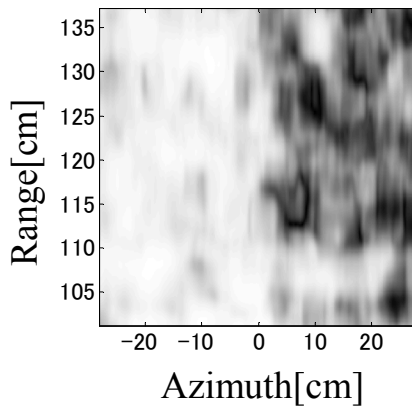


図 3.12: パウリベクトルの第二要素におけるコヒーレンスマップ

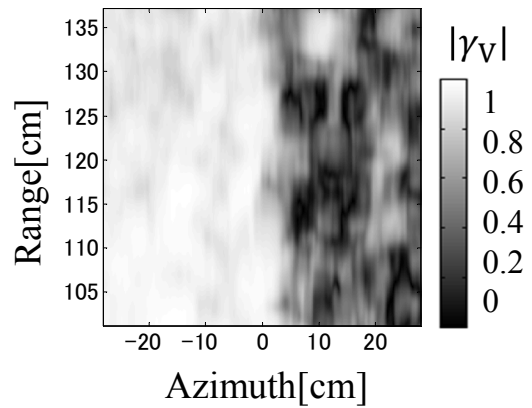


図 3.13: パウリベクトルの第三要素におけるコヒーレンスマップ

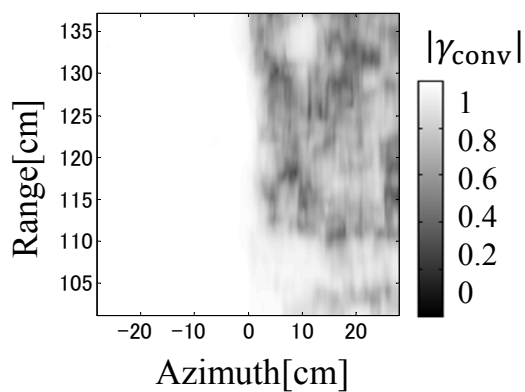


図 3.14: 従来法におけるコヒーレンスマップ

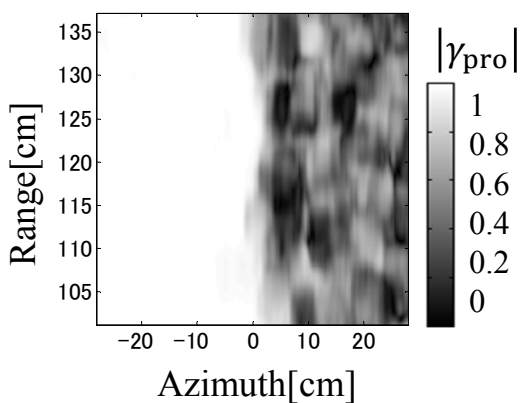


図 3.15: 提案法におけるコヒーレンスマップ

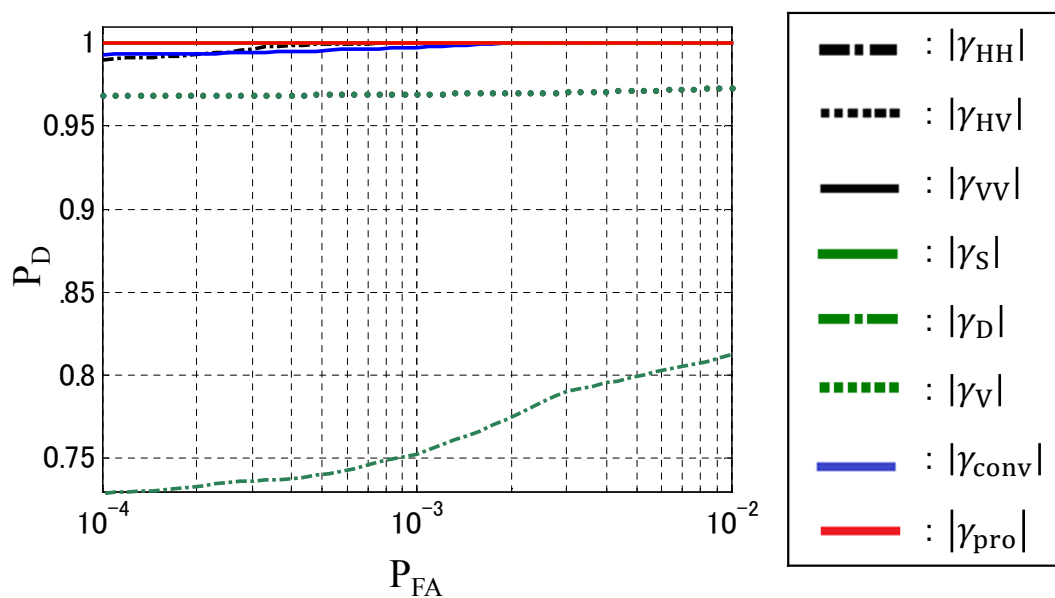


図 3.16: 検出確率対誤警報率

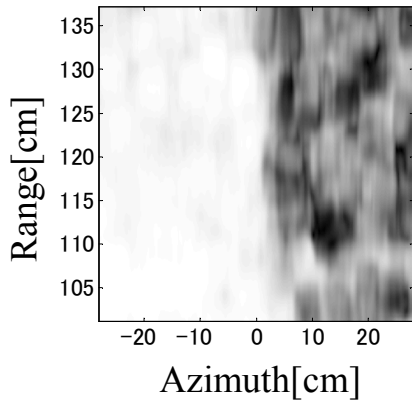


図 3.17: HH 偏波におけるコヒーレンスマップ

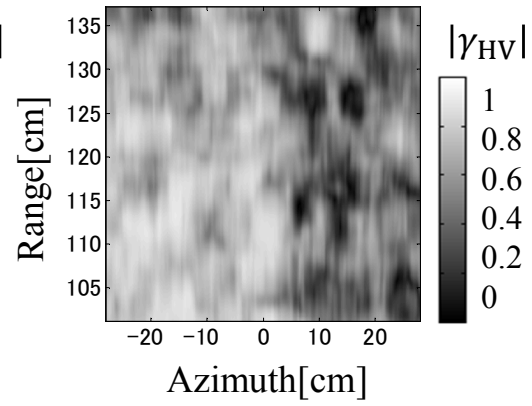


図 3.18: HV 偏波におけるコヒーレンスマップ

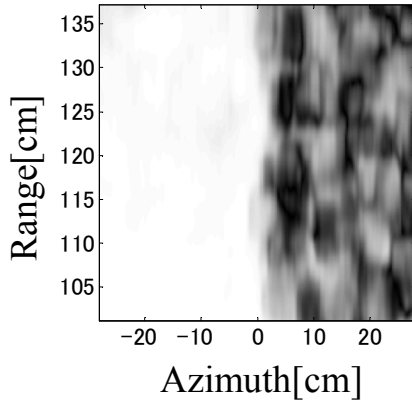


図 3.19: VV 偏波におけるコヒーレンスマップ

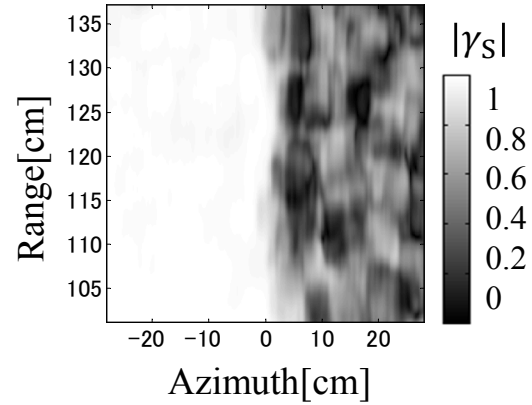


図 3.20: パウリベクトルの第一要素におけるコヒーレンスマップ

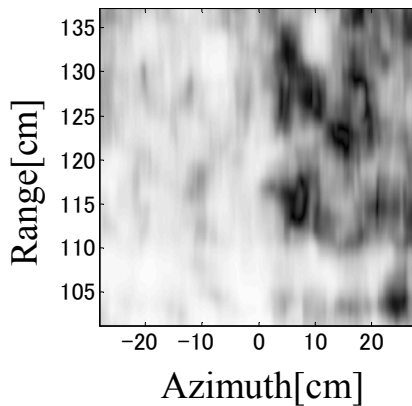


図 3.21: パウリベクトルの第二要素におけるコヒーレンスマップ

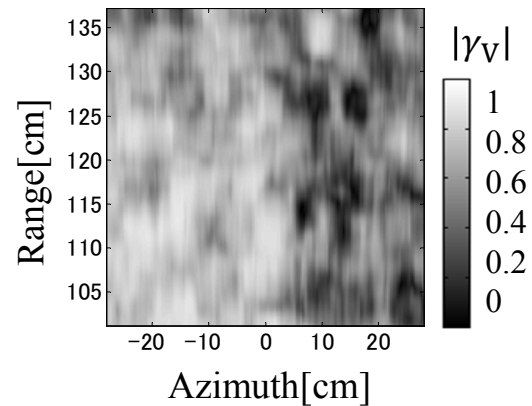


図 3.22: パウリベクトルの第三要素におけるコヒーレンスマップ

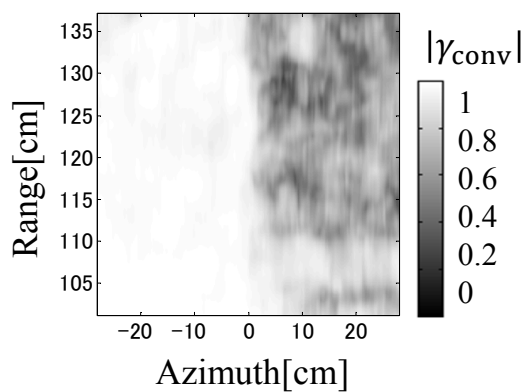


図 3.23: 従来法におけるコヒーレンスマップ

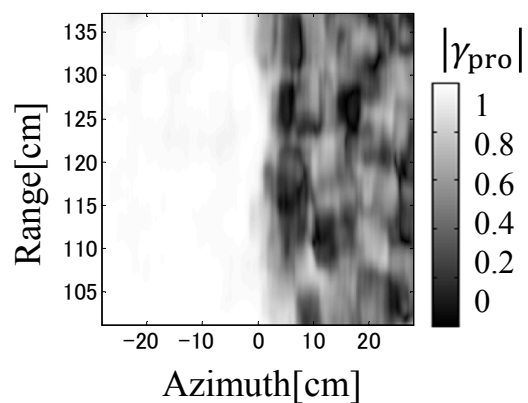


図 3.24: 提案法におけるコヒーレンスマップ

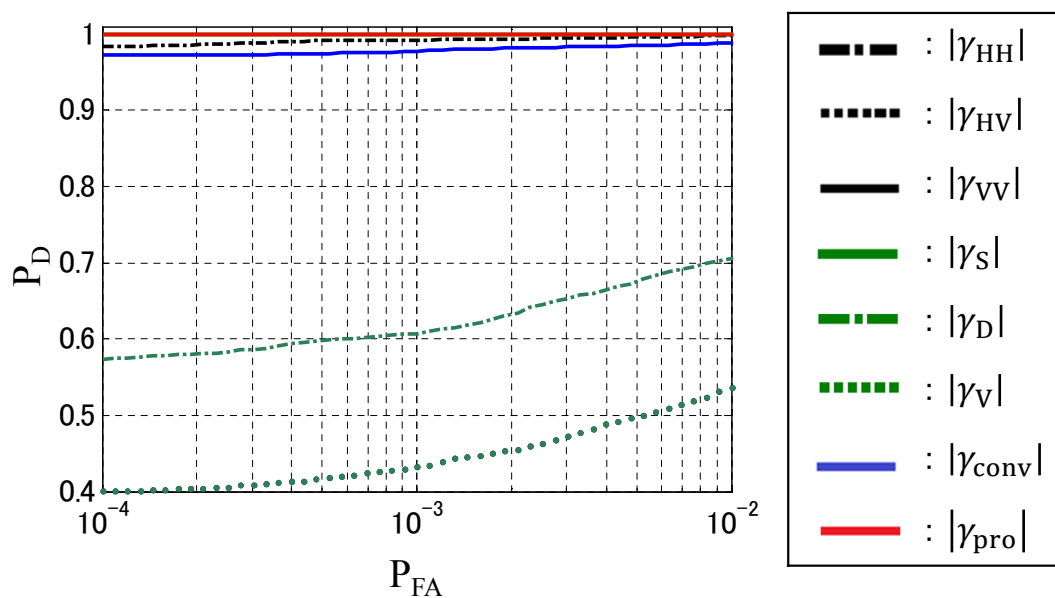


図 3.25: 検出確率対誤警報率

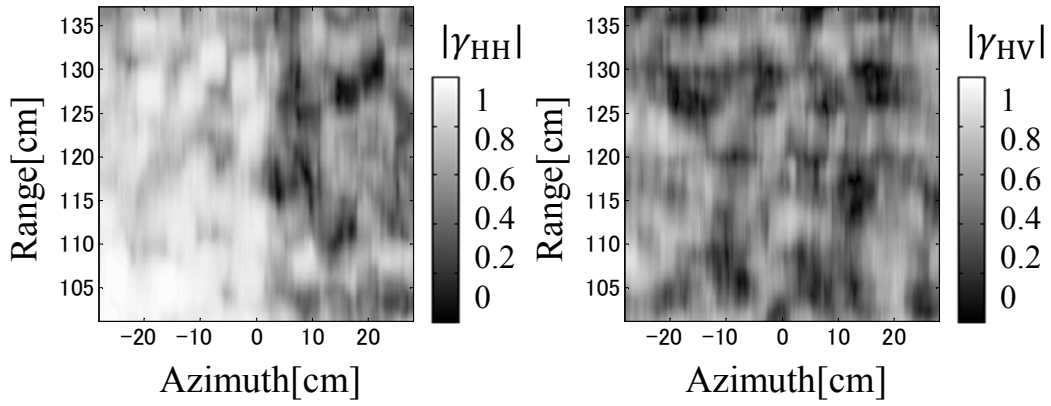


図 3.26: HH 偏波におけるコヒーレンスマップ 図 3.27: HV 偏波におけるコヒーレンスマップ

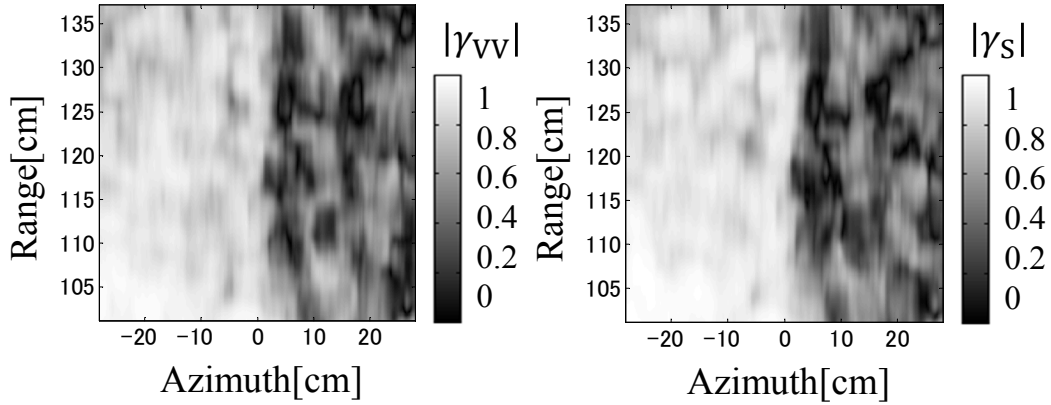


図 3.28: VV 偏波におけるコヒーレンスマップ 図 3.29: パウリベクトルの第一要素におけるコヒーレンスマップ

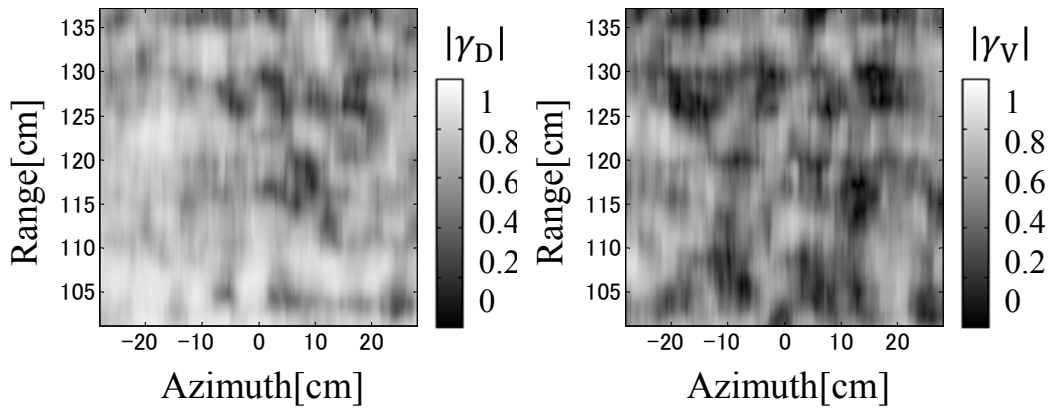


図 3.30: パウリベクトルの第二要素におけるコヒーレンスマップ 図 3.31: パウリベクトルの第三要素におけるコヒーレンスマップ

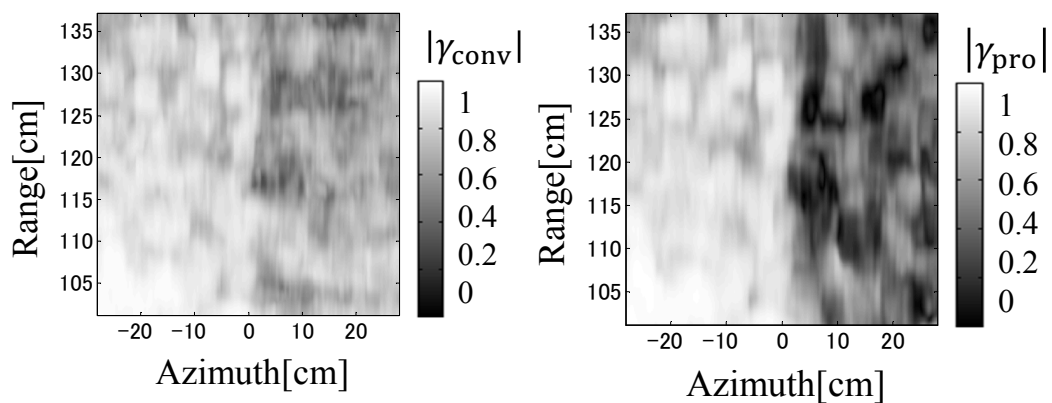


図 3.32: 従来法におけるコヒーレンスマップ 図 3.33: 提案法におけるコヒーレンスマップ

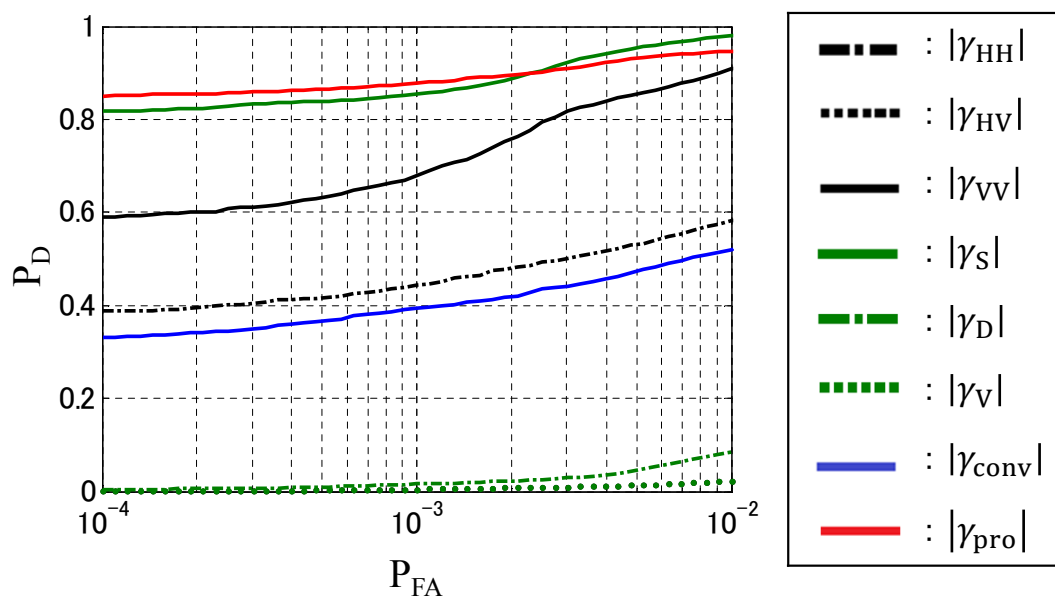


図 3.34: 検出確率対誤警報率

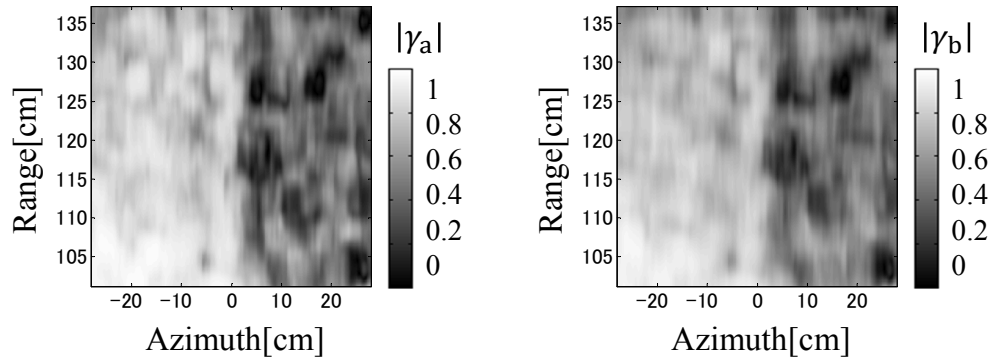


図 3.35: (a) の場合のコヒーレンスマップ 図 3.36: (b) の場合のコヒーレンスマップ

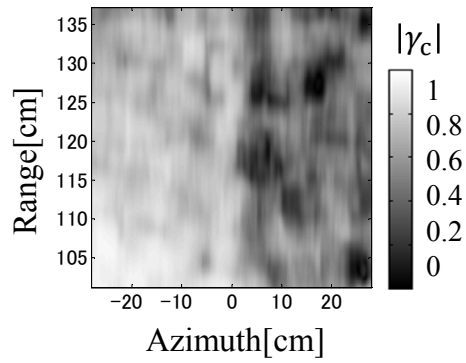


図 3.37: 提 (c) の場合のコヒーレンスマップ

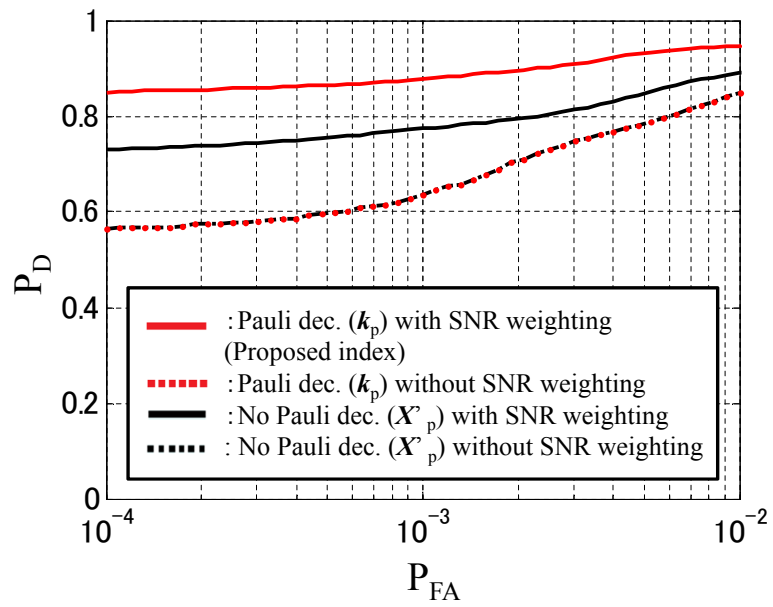


図 3.38: 検出確率対誤警報率

第4章 帯域分割とパウリ分解を用いた高度変化量推定法

CCD モデルにおける高度変化量推定手法として，帯域分割 SAR 画像間の位相干渉を用いた目標高度変化量推定法が提案されている [9]．本章では，推定精度向上を目的として，同手法を多偏波 SAR 画像へ拡張する．具体的には，帯域分割された多偏波 SAR 画像をパウリ分解し，そのコヒーレンス関数の位相を用いて高度変化量を推定する．また，高度変化量抽出の前処理として重要である位置合わせを高精度に行う手法を提案する．従来法，提案法について，実験データに基づく性能評価を行う．

4.1 システムモデル

図 4.1 の様なモデルについて考える．観測目標は $z = 0$ 平面に存在し，ランダムな凹凸を持つものとする．モノスタティックレーダを仮定し， $y = 0, z = z_0$ においてアンテナを x 軸方向に直線走査する．オフナディア角を θ とする．1 回の観測で，水平 (H)，垂直 (V) 方向の直線偏波を送受信で切り替え，全ての組合せのデータを取得する．送受信信号の伝搬速度は一定であり，真空中の光速 c とする．1 回目の観測後，目標表面の一部が z 軸方向に $\Delta z_{true}(x, y)$ だけ一様に変化すると仮定する．変化後に 2 回目の観測を行う．

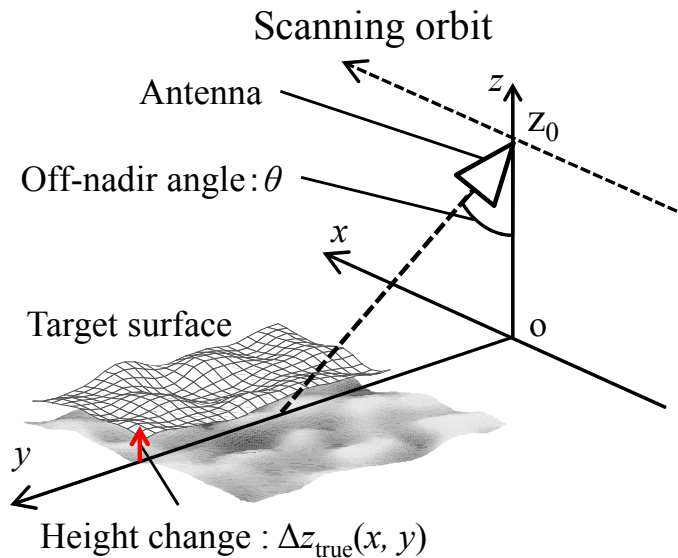


図 4.1: 高度変化量推定モデル

4.2 従来法の原理

前章で紹介した CCD は目標の変化の有無を検出することはできるが，変化量の推定を行えないという問題を有する．同問題に対し，CCD モデルを用いた高度変化量推定法が提案されている [9]．同手法は受信信号の周波数帯域を N 分割し，各帯域における高度変化推定量に対する非線形当てはめにより，位相誤差の影響を抑圧する．また，当てはめにおいてはアンビグイティ分布の周波数特性を利用し，高精度な高度変化量推定を実現しながら，アンビグイティの除去を同時に行う．本節では同手法の推定原理について示す．コヒーレンス関数が SAR 画像間の位相干渉に基づくことから，コヒーレンス関数の位相成分に含まれる距離差を用いて高度変化量を推定する．本手法における高度変化モデルを図 4.2 に示す．変化前後の SAR 画像を以下で定義する．

$$s_i(x, y) \approx |s_i(x, y)| \exp \left[-j4\pi \frac{f_c}{c} R_i(x, y) \right] : (i = 1, 2) \quad (4.1)$$

ただし， $R_i(x, y)$ は i 回目の観測時におけるスラントレンジ距離である．2 回の観測間に生じた距離差を $\Delta R(x, y) = R_2(x, y) - R_1(x, y)$ とする．このとき， $\Delta R(x, y)$ とコヒーレンス関数の位相成分 $\psi(x, y)$ の関係は次式で表される．

$$\Delta R(x, y) \approx -\frac{c}{4\pi f_c} \psi(x, y) \quad (4.2)$$

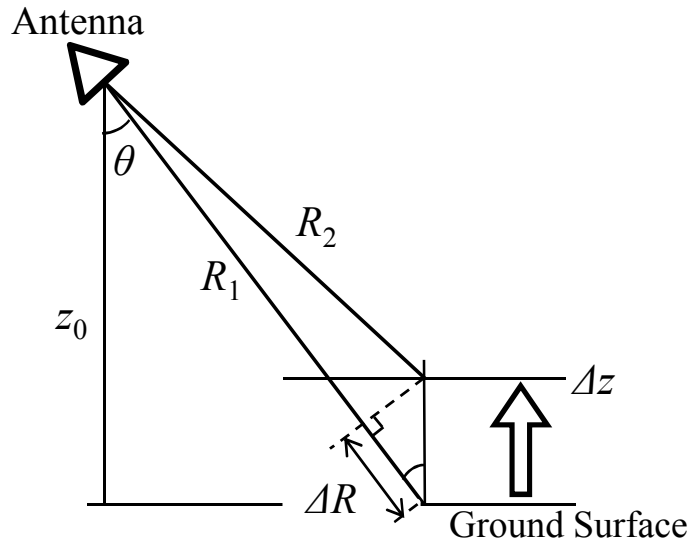


図 4.2: 高度変化モデル

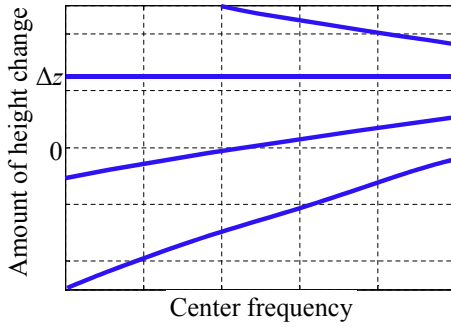


図 4.3: 高度変化量推定で取り得る値

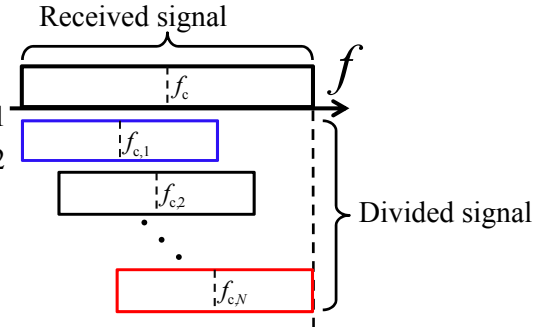


図 4.4: 受信信号の複数帯域分割

z 軸方向の変化量 $\Delta z(x, y)$ は $\Delta z(x, y) \approx \Delta R(x, y)/\cos\theta$ の関係から，以下の式で求めることができる．

$$\Delta z(x, y) \approx -\frac{c}{4\pi f_c \cos\theta} \psi(x, y) \quad (4.3)$$

ここで， ψ が $|\psi| \leq \pi$ の範囲を超えた場合，アンビギュイティと呼ばれる位相不確定性による誤差が発生する．アンビギュイティによる位相回転量は中心周波数に対応する波長の整数倍で表される．したがって，(4.3) の取り得る値は以下の様になる．

$$\begin{aligned} \Delta z_{\text{amb}}(x, y; f_c) &= -\frac{c}{4\pi f_c \cos\theta} (\psi_{\text{true}}(x, y; f_c) + k2\pi) \\ &= \Delta z(x, y) + \frac{kc}{2f_c \cos\theta} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ただし， $\psi_{\text{true}}(x, y; f_c)$ は真の位相量， k は位相の回転数を表す任意の整数である．図 4.3 に中心周波数に対する Δz_{amb} の様子を示す．(4.21) の第 2 項により，中心周波数に対する周波数特性を持つ複数の曲線の集合が描かれる．この曲線群は高度変化量推定における候補値を表し，高度変化量 Δz について一意に定められる．この周波数特性を利用するため，[9] では受信信号を図 4.4 の様に N 個の周波数帯域に分割する．各帯域の中心周波数を $f_{c,n}$ ($n = 1, 2, \dots, N$) とする．各帯域毎に式 (4.3) に基づいて高度変化量 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n})$ を推定する．

$$\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n}) = -\frac{c}{4\pi f_{c,n} \cos\theta} \psi(x, y; f_{c,n}) \quad (4.5)$$

ただし， $\psi(x, y; f_{c,n})$ は帯域毎のコヒーレンス関数の位相である．図 4.5 に各中心周波数に対する高度変化推定量 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n})$ の分布と，図 4.3 に示した

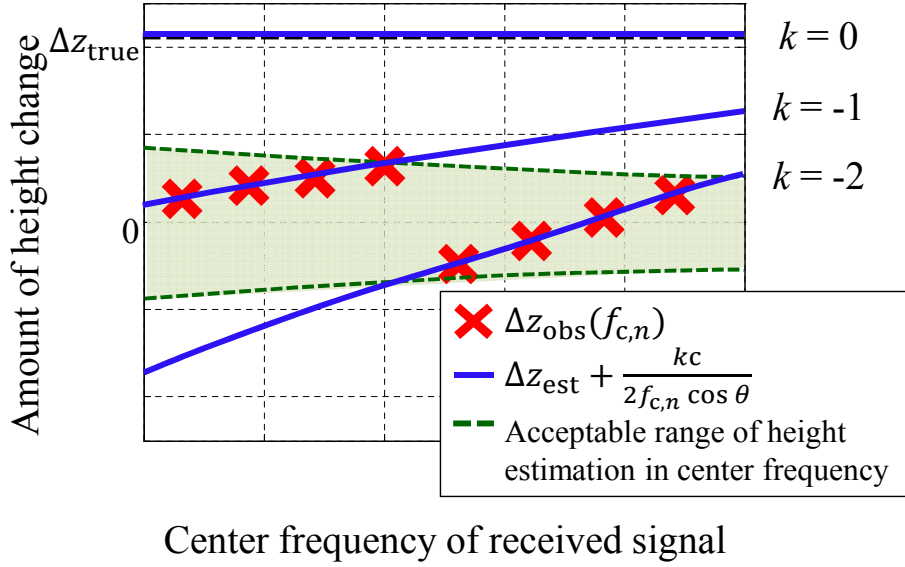


図 4.5: 各周波数に対する推定値

アンビギュイティ曲線群を重ねた図を示す．同図において， \times 印は各帯域毎の高度変化推定量 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n})$ ，青実線は Δz_{est} についてのアンビギュイティ $\Delta z_{\text{amb}}(x, y; f_c)(k = -2, -1, 0)$ ，緑破線によって区切られた範囲は単一周波数による高度変化量推定可能範囲を表す．同図の様にアンビギュイティの曲線群と各帯域の高度変化推定量を一致させると， $k = 0$ で真の高度変化量 Δz_{true} となるため，推定可能範囲外の高度変化量を推定することができる．この思想に基づいた評価関数を用いて，次式で高度推定量 $\hat{\Delta z}(x, y)$ を求める．

$$\hat{\Delta z}_{\text{est}}(x, y) = \arg \min_{\Delta z} \sum_{n=1}^N \min_{k \in \mathbf{Z}} \left| \Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n}) - \left(\Delta z + \frac{kc}{2f_{c,n} \cos \theta} \right) \right|^2 \quad (4.6)$$

ただし， Δz は探索パラメータであり，探索範囲 $[-\Delta z_{\text{max}} \ \Delta z_{\text{max}}]$ 内にある極小値を探索する．図 4.6 に探索の様子を示す．評価関数は周期的に極小点を持つ．同極小点は $\Delta z_{\text{amb}}(x, y; f_c)$ の曲線群が $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n})$ に近接する状態であり，曲線群の間隔である 1 波長分の高度変化量 $c/(2f_c \cos \theta(x, y))$ 程度の間隔で現れる．探索初期値は最も推定可能範囲が広くアンビギュイティが生じにくい最低周波数帯域の推定値 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,1})$ とする．この点を図 4.6 の A 点とする．最適化手法である最急降下法を用いて最近接極小点 A' を得る．局所最適解に陥ることを避けるため，収束後に前述の極小点の間隔 $c/(2f_c \cos \theta(x, y))$ だけ離れた値 (図 B 点) を初期値として再び最急降下法を適用する．探索範囲 $[-\Delta z_{\text{max}} \ \Delta z_{\text{max}}]$ 内の極小点について最適化を行い，最良値を採用する．

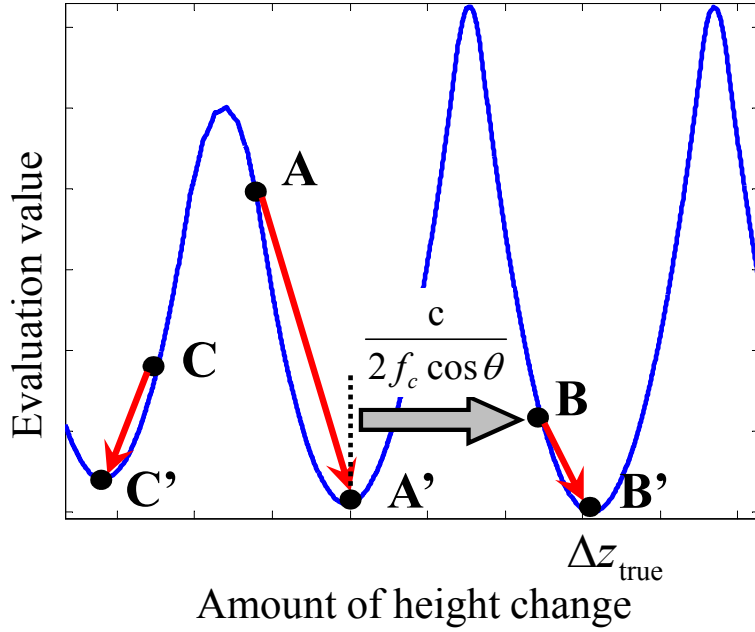


図 4.6: 最適化評価関数

以下に本手法の手順を示す．

手順 1) 受信信号を帯域幅の等しい N 個の周波数帯域に分割し，SAR 画像

$s_1(x, y; f_{c,n})$ 及び $s_2(x, y; f_{c,n})$ を生成する．

手順 2) $s_1(x, y; f_{c,n})$ と $s_2(x, y; f_{c,n})$ から各帯域でコヒーレンス関数 $\gamma(x, y; f_{c,n})$ を計算し， $\gamma(x, y; f_{c,n})$ の位相 $\psi(x, y; f_{c,n})$ を抽出する．

手順 3) コヒーレンス関数の位相 $\psi(x, y; f_{c,n})$ から，式 (4.3) により各帯域で高度変化量 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,n})$ を推定する．

手順 4) 最低周波数帯域の高度変化量 $\Delta z_{\text{obs}}(x, y; f_{c,1})$ を初期値とし，式 (4.6) に示す評価関数の最適解を最急降下法により求める．

手順 5) 評価関数の周期性から， $c/(2f_c \cos \theta(x, y))$ 離れた値を初期値として再度最急降下法を適用する．

手順 6) 探索範囲 $[-\Delta z_{\text{max}}, \Delta z_{\text{max}}]$ 内の大域的最適解を高度変化量 $\hat{\Delta z}_{\text{est}}(x, y)$ とする．

図 4.7 に本手法のフローチャートを示す．

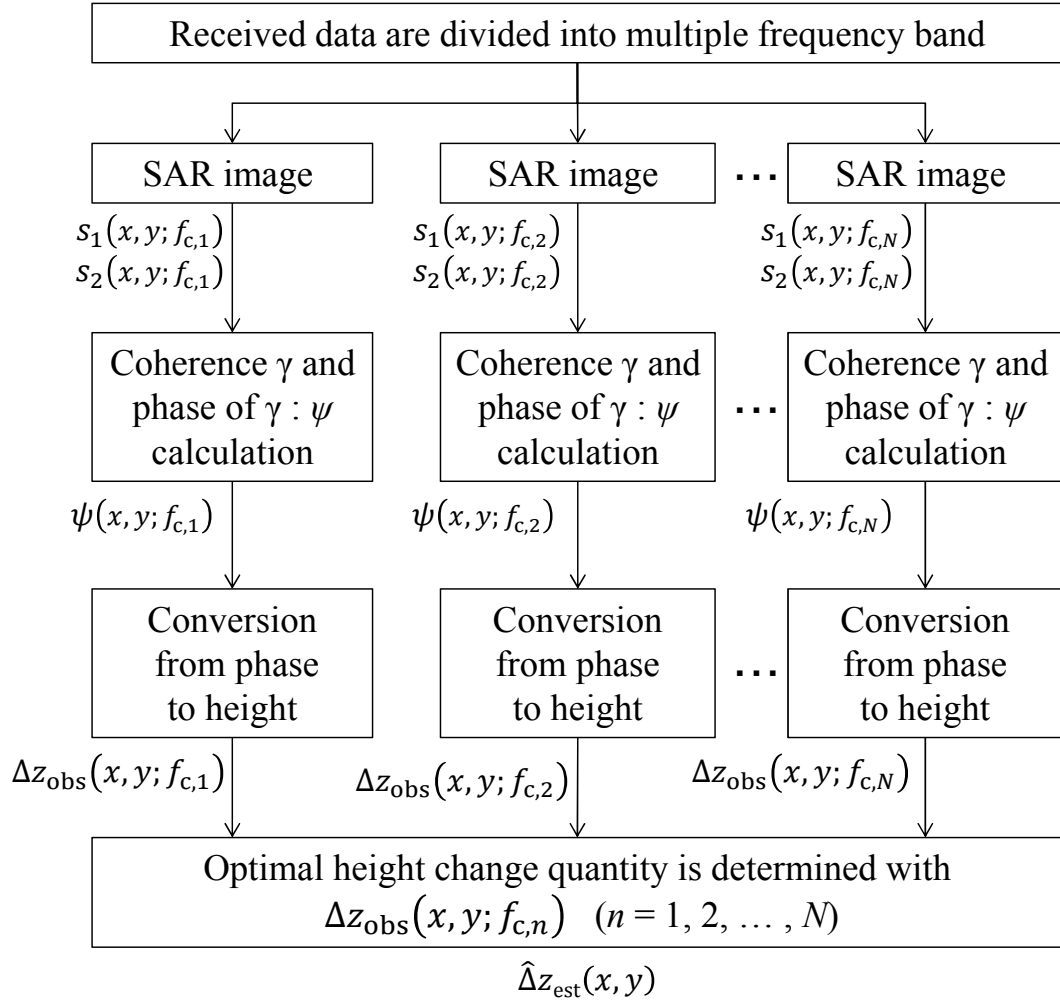


図 4.7: 従来法処理手順

4.3 提案法の原理

本節では提案法の推定原理を示す．まず，多偏波で取得された受信信号を N 個の周波数帯域に分割する．各帯域の中心周波数を $f_{c,n}$, ($n = 1, 2, \dots, N$) とする．帯域分割された各偏波の受信信号から SAR 画像を生成し，以下の散乱ベクトルを得る．

$$\mathbf{X}_p(x, y; f_{c,n}) = \begin{bmatrix} S_{HH,p}(x, y; f_{c,n}) \\ \sqrt{2}S_{HV,p}(x, y; f_{c,n}) \\ S_{VV,p}(x, y; f_{c,n}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ただし， $p(=1,2)$ は観測回の指標を表す．同散乱ベクトルをパウリ分解することにより，次式で表されるパウリ散乱ベクトルを得る．

$$\mathbf{k}_p(x, y; f_{c,n}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH,p}(x, y; f_{c,n}) + S_{VV,p}(x, y; f_{c,n}) \\ S_{HH,p}(x, y; f_{c,n}) - S_{VV,p}(x, y; f_{c,n}) \\ 2S_{HV,p}(x, y; f_{c,n}) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

次に，式 (4.8) で得られた $\mathbf{k}_1(x, y; f_{c,n})$ ， $\mathbf{k}_2(x, y; f_{c,n})$ について，次節に示す位置合わせ処理を施した後に，各要素・帯域ごとにコヒーレンス関数 (3.1) に入力することで $\gamma_r(x, y; f_{c,n})$ を計算し，2 回の観測間の位相差 $\psi_r(x, y; f_{c,n})$ を導出する．ただし， $r = \{1, 2, 3\}$ は式 (4.8) の行番号を表す．その後，4.2 節の式 (4.3) に基づいて $\psi_r(x, y; f_{c,n})$ から高度変化量 $\Delta z_{\text{obs},r}(x, y; f_{c,n})$ を以下の様に計算する．

$$\Delta z_{\text{obs},r}(x, y; f_{c,n}) = -\frac{c}{4\pi f_{c,n} \cos \theta} \psi_r(x, y; f_{c,n}), \quad (4.9)$$

ここで， $\psi_r(x, y; f_{c,n})$ に含まれる可能性があるアンビギュイティ誤差を除去するため，パウリベクトルの第 r 要素における評価関数を次式で定義する．

$$e_r(x, y, \Delta z) = \sum_{n=1}^N \min_{k \in \mathbf{Z}} \left| \Delta z_{\text{obs},r}(x, y; f_{c,n}) - \left(\Delta z + \frac{kc}{2f_{c,n} \cos \theta} \right) \right|^2 \quad (4.10)$$

最適化手法のひとつである最急降下法を用いて，評価関数 (4.10) を最小にする最適解 $\hat{\Delta z}_r(x, y)$ を以下のように求める．

$$\hat{\Delta z}_r(x, y) = \arg \min_{\Delta z} e_r(x, y, \Delta z) \quad (4.11)$$

ただし， Δz は探索パラメータであり，探索範囲 $[-\Delta z_{\text{max}}, \Delta z_{\text{max}}]$ 内にある極小値を探索する．このとき，最適解 $\hat{\Delta z}_r(x, y)$ はパウリ散乱ベクトルの各要素 r 毎

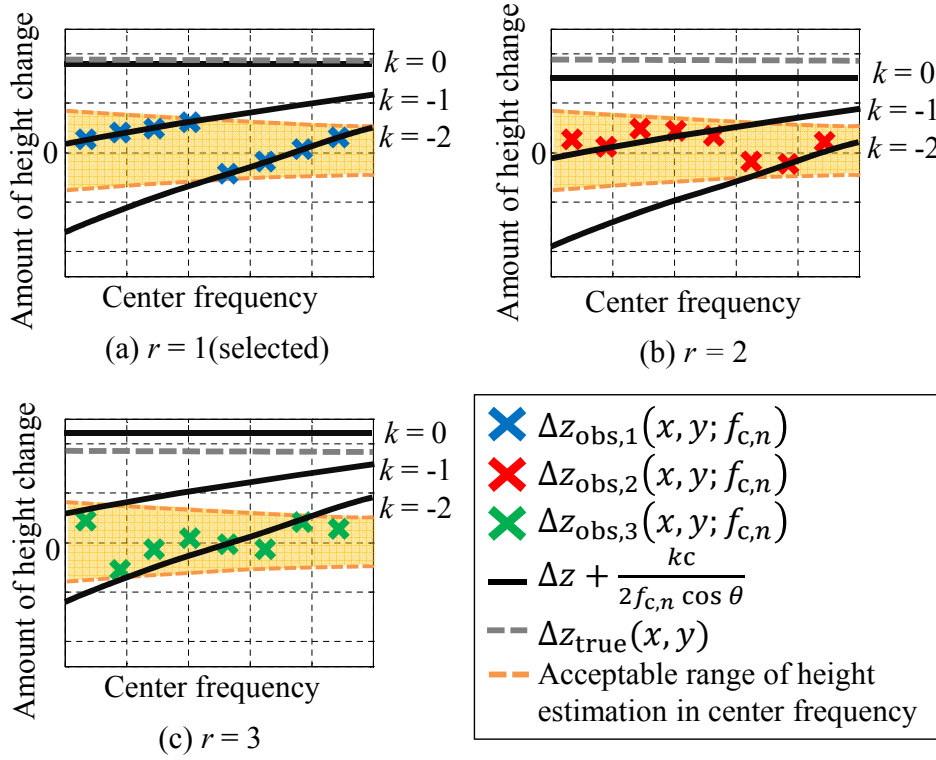


図 4.8: 提案法模式図 (表面散乱が支配的な場合)

に求められるため，次式で最適な要素 \hat{r} を定める．

$$r_{\text{opt}}(x, y) = \arg \min_r e_r(x, y, \hat{\Delta z}_r) \quad (4.12)$$

ここで，探索パラメータ r の取り得る値は $r = \{1, 2, 3\}$ である．以上の処理により，本手法における高度変化量推定値が次式で得られる．

$$\hat{\Delta z}_{\text{pro}}(x, y) = \hat{\Delta z}_{r_{\text{opt}}(x, y)}(x, y) \quad (4.13)$$

図 4.8 に，表面散乱が支配的な目標を観測した場合の，提案法の推定の様子を示す．同図において，(a)，(b)，(c) はそれぞれパウリベクトルの第 1 要素，第 2 要素，第 3 要素のデータを用いた推定の様子を表す．また， \times 印は各帯域毎の高度変化推定量 $\Delta z_{\text{obs},r}(x, y; f_{c,n})$ ，黒実線は Δz についてのアンビギュイティ ($k = -2, -1, 0$)，灰色の破線は高度変化量真値 $\Delta z_{\text{true}}(x, y)$ ，橙色の破線によって区切られた範囲は単一周波数による高度変化量推定可能範囲を表す．

同図 (a) では表面散乱成分の SNR が高いため，曲線群と各帯域の高度変化推定量はよく一致する．一方で，(b),(c) は SNR が十分ではないため，各帯域の

高度変化推定量にばらつきが生じており，推定に誤差が生じる．このような場合，本手法は式 (4.12) によって，評価関数を最小とする要素 $r = 1$ を選択する．即ち，パウリ分解によって地表面構造に応じた支配的な散乱成分を抽出することが可能となり，支配成分における高度変化推定量を最適値として採用することで，推定精度の改善効果が期待できる．以下に本手法の手順を示す．

手順 1) 多偏波で取得した受信信号を帯域幅の等しい N 個の周波数帯域に分割して SAR 画像を生成し，パウリ散乱ベクトル $\mathbf{k}_1(x, y; f_{c,n})$, $\mathbf{k}_2(x, y; f_{c,n})$ を取得する．

手順 2) $\mathbf{k}_1(x, y; f_{c,n})$, $\mathbf{k}_2(x, y; f_{c,n})$ の各要素・帯域でコヒーレンス関数 $\gamma_r(x, y; f_{c,n})$ を計算し， $\gamma_r(x, y; f_{c,n})$ の位相 $\psi_r(x, y; f_{c,n})$ を抽出する．

手順 3) コヒーレンス関数の位相 $\psi_r(x, y; f_{c,n})$ から，式 (4.9) により各帯域で高度変化量 $\Delta z_{\text{obs},r}(x, y; f_{c,n})$ を推定する．

手順 4) 式 (4.10) に示す評価関数の最適解 $\hat{\Delta} z_r(x, y)$ を最急降下法により求める．

手順 5) 式 (4.12) を用いて，評価値を最小にするパウリベクトルの要素 \hat{r} を求め， $\hat{\Delta} z_{\hat{r}}(x, y)$ を本手法における高度変化量 $\hat{\Delta} z_{\text{pro}}(x, y)$ とする．

図 4.9 に本手法のフローチャートを示す．

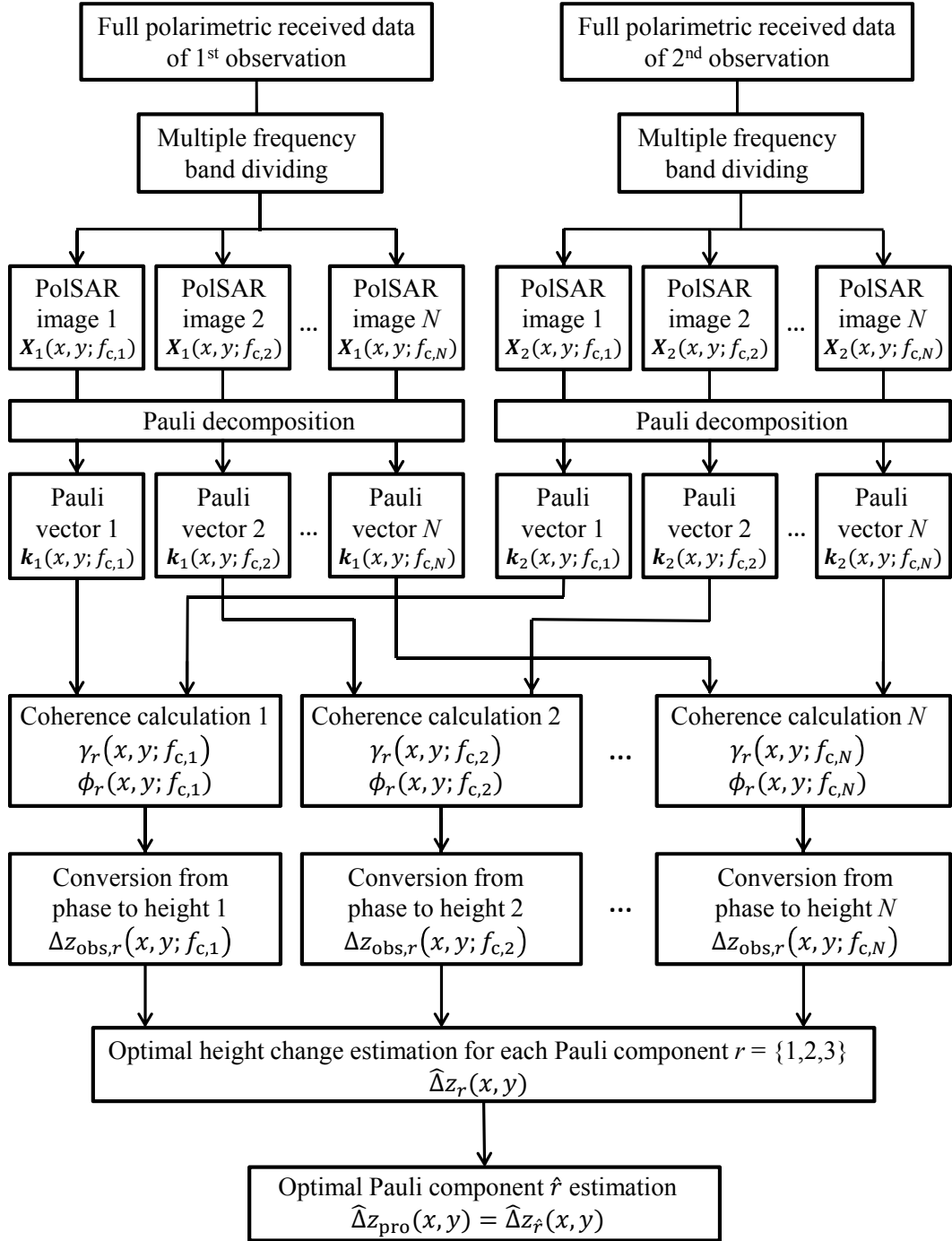


図 4.9: 提案法処理手順

4.4 局所的空間相関に基づく位置合わせ法

2 回目に観測された SAR 画像は Δz_{true} の高度変化によりレイオーバが生じる。したがって、高度変化量推定の前処理として SAR 画像の位置合わせが不可欠である。従来の高度変化量推定手法 [9] では、変化前後 SAR 画像の 2 次元相互相関によりずれの量を推定する。しかし、同手法は取得された SAR 画像全体を使用して相互相関計算するため、高度変化が SAR 画像中の一部でのみ発生する場合、ずれの推定が不可能である。また、同手法は単一偏波成分しか考慮していないため、目標の形状情報が不十分である。これらの問題に対し、本節では多偏波 SAR 画像を用いた小範囲毎の位置合わせ法を提案する。まず、多偏波で取得した SAR 画像について、コヒーレンス関数 (3.1) を計算する際の相関範囲 $\Omega(x, y)$ に相当する範囲のデータから、以下のパウリ散乱ベクトルを計算する。

$$\mathbf{k}_p(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{\text{HH},p}(x, y) + S_{\text{VV},p}(x, y) \\ S_{\text{HH},p}(x, y) - S_{\text{VV},p}(x, y) \\ 2S_{\text{HV},p}(x, y) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ただし、 $p(=1,2)$ は観測回の指標を表す。式 (4.14) の各要素を重み付け合成することで、以下のような強度画像 $I_p(x, y)$ を得る。

$$I_p(x, y) = \sum_{r=1}^3 w_{p,r} |\mathbf{k}_{p,r}(x, y)| \quad (4.15)$$

ただし、 $w_{p,r}$ は次式で定義される重み付けベクトル w_p の第 r 要素を表す。

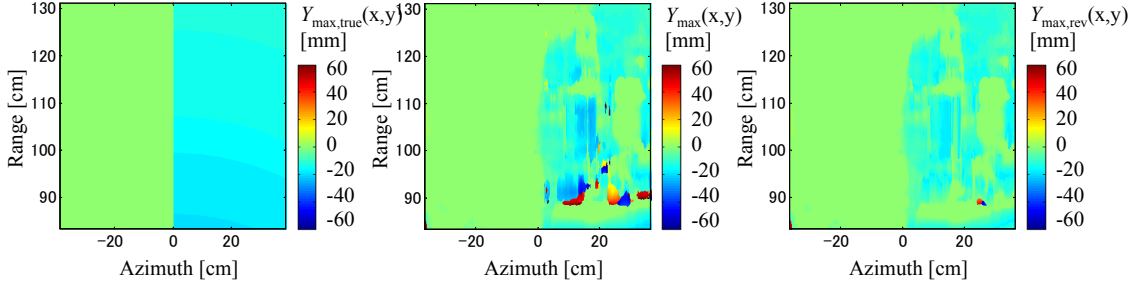
$$w_p = \frac{1}{\sum_{r=1}^3 \text{SNR}_{p,r}} \text{diag}(\text{SNR}_{p,1}, \text{SNR}_{p,2}, \text{SNR}_{p,3}) \quad (4.16)$$

ここで、 $\text{SNR}_{p,r}$ は式 (4.14) の第 r 要素の平均電力と雑音領域の平均電力の比であり、次式で定義される。

$$\text{SNR}_{p,r} = \frac{E[|\mathbf{k}_{p,r}(x, y)|^2]}{E[|\mathbf{n}_{p,r}(x, y)|^2]} \quad (4.17)$$

ただし、 $\mathbf{n}_{p,r}$ はパウリベクトルの第 r 要素における観測雑音を表す。 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ に対し、次式で表される 2 次元相互相関処理を施す事により、小範囲 $\Omega(x, y)$ 内におけるずれの量を推定する。

$$\epsilon(x', y') = \left| \text{IFFT2} \left[\text{FFT2} [I_1(x, y)] \cdot \text{FFT2}^* [I_2(x, y)] \right] \right| \quad (4.18)$$



(a) 真値 $Y_{\max,\text{true}}(x, y)$ (b) 推定値 $Y_{\max}(x, y)$ (c) 補正值 $Y_{\max,\text{rev}}(x, y)$

図 4.10: 目標右半面が一様に隆起した場合のずれの量 ((a): 真値, (b): 推定値, (c): 補正值)

ただし, FFT2 , IFFT2 はそれぞれ 2 次元高速フーリエ変換, 2 次元高速逆フーリエ変換の演算子を表す. 次に $\epsilon(x, y)$ について, 最大値における座標を以下のように取得する.

$$(X_{\max}(x, y), Y_{\max}(x, y)) = \arg \max_{x', y'} (\epsilon(x', y')) \quad (4.19)$$

式 (4.19) で得られた $(X_{\max}(x, y), Y_{\max}(x, y))$ だけ 2 回目に観測した画像を平行移動させることにより座標補正を行う. 以上の処理を相関範囲 $\Omega(x, y)$ を少しずつずらしながら行うことにより, 部分的な画像のずれにも対応することができる.

ただし, $(X_{\max}(x, y), Y_{\max}(x, y))$ は $\Omega(x, y)$ 内における変化前後の SAR 画像の最大強度の位置に大きく依存する. そのため, SAR 画像の強度分布のパターンによっては, ずれの量の真値から大きく外れる場合が存在する. そこで, ずれの量の推定結果について, そのはずれ値を検出・補正する手法を提案する. 本手法はまず, 3.3 節で提案した変化検出指標 (3.12) を用いて 2 回の観測間に变化した領域 $(x_{\text{change}}, y_{\text{change}})$ を検出する. 次に, X_{\max} , Y_{\max} について, 先に検出した変化領域に該当する値 $X_{\max}(x_{\text{change}}, y_{\text{change}})$, $Y_{\max}(x_{\text{change}}, y_{\text{change}})$ を抽出し, その標準偏差をそれぞれで計算する. 次に, $X_{\max}(x_{\text{change}}, y_{\text{change}})$, $Y_{\max}(x_{\text{change}}, y_{\text{change}})$ について, 先に計算した標準偏差よりも偏差が大きい部分を検出・除去する. 最後に, 除去した部分に対し線形補間を行うことにより, はずれ値を補正する. 図 4.10 に, 目標右半面が一様に隆起した場合のずれの量の真値 $Y_{\max,\text{true}}(x, y)$, 式 (4.19) により得られる推定値 $Y_{\max}(x, y)$ 及び上記補正法を適用した補正值 $Y_{\max,\text{rev}}(x, y)$ を示す. 同図 (b) に生じていたはずれ値が, 提案した補正法により (c) では解消され, 真値に近づいていることが確認できる.

4.5 実験データを用いた高度変化量推定の性能評価

本節では従来法，提案法について，実験データに基づく性能評価を行う．

4.5.1 実験諸元

レーダ信号取得のための実験緒元を示す．本実験はXバンドレーダを想定し，中心周波数以外の緒元を1/100スケールモデルとして性能評価を行う．図4.11に実験システムの外観を示す．電波暗室内で観測を行う．送信信号の生成及び受信信号の取得にはベクトルネットワークアナライザを用いる．ただし，送信側では20dBの増幅器を介する．観測目標として地表面を模した同じ大きさの2つの粘土板を設置する．粘土目標1つあたりの大きさを幅40cm，奥行き50cm，高さ10cmとする．目標表面には±約1mmの凹凸を与える．二つの粘土目標を x 軸方向に並べる． $x \geq 0$ 側の粘土目標は昇降機で支え，この領域での高度変化を模擬する．高度変化量 Δz_{true} を5mm，10mm，20mmとする．送受信アンテナを $-800 \text{ mm} \leq x \leq 800 \text{ mm}$ ， $y = 0 \text{ mm}$ ， $z_0 = 900 \text{ mm}$ で直線走査する．合成開口点数を200点とする．オフナディア角 $\theta = 50^\circ$ とする．掃引周波数範囲を26 GHzから40 GHzとする．目標以外からの反射を防ぐため，周囲に電波吸収体を配置する．帯域分割数を7，分割後の帯域幅を8GHz，隣接する帯域間の中心周波数差を1GHzとする．CCDにおける相関範囲をSAR画像分解能の5倍とする．このとき，レンジ方向の分解能は帯域分割前後でそれぞれ約14.0 mm，24.5mmとなる．また，アジマス方向の分解能は約12.5mmとなる．

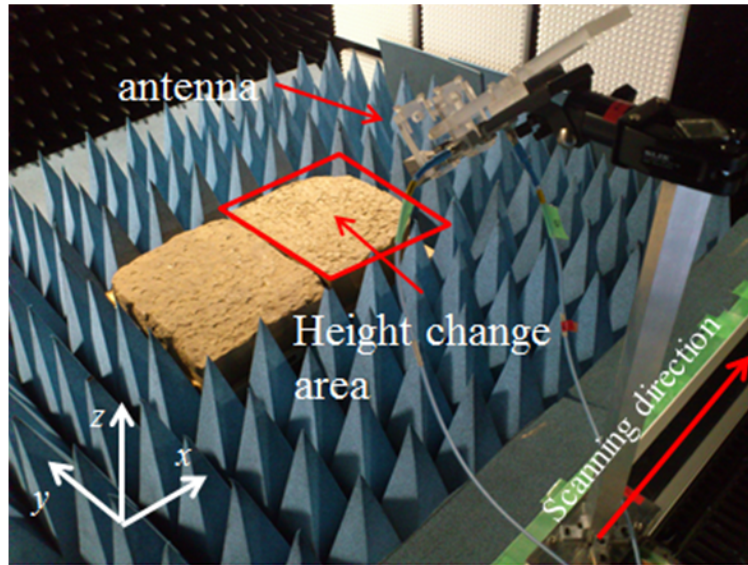


図 4.11: 実験システム外観

4.5.2 高度変化量推定精度の定量評価

本項では，3.4 節で行った実験よりも多くの SNR を模擬するため，実験データに対して以下の手順で雑音を付加する．まず，各偏波毎の SAR 画像から最大電力 $P_{S,HH}$ ， $P_{S,HV}$ ， $P_{S,VV}$ を取得し，その平均 P_S を次式で計算する．

$$P_S = \frac{1}{3}(P_{S,HH} + P_{S,HV} + P_{S,VV}) \quad (4.20)$$

次に， P_S の値に基づいて白色性ガウス雑音を生成し，各偏波で取得されたデータに加算する．このとき，各偏波の信号電力は異なるため，各偏波毎の SNR も異なる．表 4.1 に各偏波毎の SNR の値を示す．ただし， r は HH 偏波，HV 偏波及び VV 偏波の SNR の平均を表す．

次に，実験データに基づく高度変化量推定結果を示す．今回は比較用手法として，3.3 節で提案した変化検出指標を用いた高度変化量推定についても検討を行う．比較用手法の概要を以下に示す．まず，受信信号を帯域分割して生成される多偏波 SAR 画像について，各帯域毎に式 (3.12) を計算する．次に，計算された各帯域毎の多偏波コヒーレンス関数から，位相情報を取得する．最後に，取得された位相情報を基に，4.2 節に示した従来法を用いて高度変化量 $\hat{\Delta z}_{\text{comp}}$ を推定する．以上の処理により推定された $\hat{\Delta z}_{\text{comp}}$ に加えて，提案法による推定結果 $\hat{\Delta z}_{\text{pro}}$ 及び各単一偏波を用いた従来法の推定結果 $\hat{\Delta z}_{\text{HH}}$ ， $\hat{\Delta z}_{\text{HV}}$ ， $\hat{\Delta z}_{\text{VV}}$ について評価を行う．ただし，以下に示す SNR は各偏波の平均 SNR を表す r である．

図 4.12 に高度変化量 5 mm，SNR = 25 dB の場合の各手法の推定結果を示す．(a) ~ (c) は各単一偏波のみを用いた場合の従来法，(d) は先述の比較用手法，(e) は提案法，(f) は高度変化の真値の分布をそれぞれ表す．同図において，HV 偏波の推定結果が大きく劣化していることが確認できる．これは，各偏波に対

表 4.1: 各偏波・パウリ要素の SNR

偏波・要素	$r = 30[\text{dB}]$	$r = 25[\text{dB}]$	$r = 20[\text{dB}]$	$r = 15[\text{dB}]$	$r = 10[\text{dB}]$
HH 偏波	32	28	23	18	15
HV 偏波	12	12	11	11	11
VV 偏波	33	29	22	19	14
パウリベクトル第一要素	35	31	25	21	17
パウリベクトル第二要素	25	21	18	13	12
パウリベクトル第三要素	12	12	11	11	11

し平均電力のひとしい雑音を付加した結果，表 4.1 に示されるように，HV 偏波の SNR が大幅に劣化したためであると考えられる．VV 偏波，比較用手法及び提案法については，推定値，変化分布が真値に近いことが確認できる．また，HV 偏波以外の推定結果について，アンテナからの距離が遠くなるほど精度が劣化する傾向が確認できる．これは，アンテナから目標までのレンジ距離に応じて SNR が劣化するためであると考えられる．次に，高度変化量推定精度を定量的に評価するため，それぞれの結果のヒストグラムを取った結果を図 4.13 に示す．同図の横軸は高度変化推定量，縦軸はその推定量を取るピクセルの数をそれぞれ表す．また，赤のヒストグラムが変化領域 ($x > 0$) のデータを，青のヒストグラムが無変化領域 ($x \leq 0$) のデータを表し，黒の点線が高度変化量の真値 ($\Delta z_{\text{true}} = 5$) mm を表す．同図より，HV 偏波以外の推定結果は真値に収束していることが確認できる．中でも，比較用手法と提案法の真値におけるピクセル数は，各単一偏波よりも明らかに多いことから，パウリ分解の導入による推定精度の改善効果が確認できる．次に，高度変化量推定精度を統計的に評価するため，各 SNR に対するアンビギュイティ除去確率を図 4.14 に，誤差中央値を図 4.15 に，誤差四分位範囲を図 4.16 に示す．黒一点鎖線が HH 偏波，黒点線が HV 偏波，黒実線が VV 偏波を表し，赤実線が提案法，青実線が比較用手法を表す．ここでアンビギュイティ除去確率は，画像領域の中でアンビギュイティ誤差が発生しない部分の確率を表す．具体的には，画像全体のピクセル数に対する次式を満たすピクセル数の確率を表す．

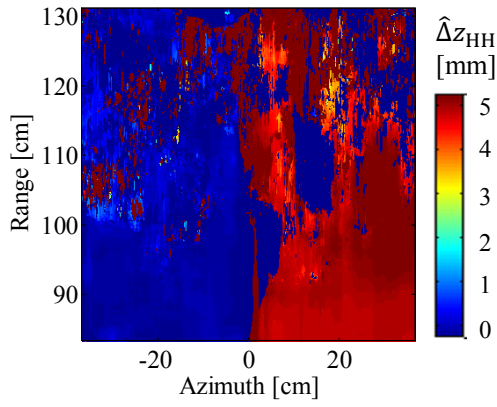
$$|\Delta z_{\text{true}}(x, y) - \hat{\Delta z}_{\text{est}}(x, y)| < \frac{c}{4f_c \cos \theta}, \quad (4.21)$$

ただし， Δz_{true} は高度変化量真値， $\hat{\Delta z}_{\text{est}}$ は推定結果， f_c は観測に用いた全周波数帯域の中心周波数， θ はオフナディア角を表す．また，誤差中央値，誤差四分位範囲はそれぞれ，真値から推定値を引いた時の中央値と四分位範囲を表し，誤差の偏りとばらつきを表す評価指標である．図 4.14 では 100% に，図 4.15，4.16 では 0 mm に近づくほど推定精度が高いことを表す．これらの図より，いずれの SNR においても提案法の各単一偏波に対する優位性が確認できる．この原因としては，パウリ分解による SNR の改善が考えられる．今回の目標は表面散乱が支配的な目標である．そのため，ほぼすべてのピクセルにおいてパウリベクトルの第一要素の強度が強調されて SNR が向上する．このとき，式 (4.9) における $\Delta z_{\text{obs},1}$ の雑音によるばらつきは小さくなる．反対に，パウリベクトル

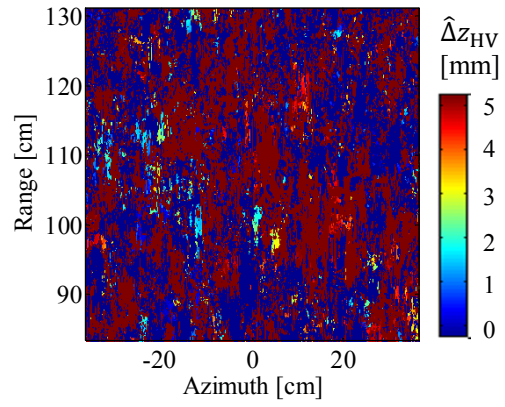
の第二要素，第三要素は強度が小さくなるため SNR が劣化し，式 (4.9) における $\Delta z_{\text{obs},2}$, $\Delta z_{\text{obs},3}$ の雑音によるばらつきは大きくなる．提案法は，一定周期で現れるアンビギュイティ曲線群と $\Delta z_{\text{obs},r}$ との差が最小となる様に，高度変化量とパウリベクトルの要素を選択する．したがって，雑音によってばらついていく $\Delta z_{\text{obs},2}$, $\Delta z_{\text{obs},3}$ はアンビギュイティ曲線群に一致しないため，選択されにくい．その結果，提案法は雑音に対し耐性がある第一要素のみを用いる場合とほぼ等価になるため，推定精度が向上したと考えられる．また，提案法と比較用手法を比較すると，ほとんどの場合において，提案法が優位であることを確認できる．この原因としては，HV 偏波を含む割合の違いが考えられる．各評価結果から示されるように，HV 偏波の推定精度は劣悪である．比較用手法は重みが小さいとはいえ，すべてのピクセルにわずかな HV 偏波を含む．これに対し，提案法では評価関数値に基づくスイッチングにより，HV 偏波を全く含まないピクセルが数多く存在する．したがって，提案法の方が HV 偏波の影響を抑制できるため，推定精度に差が生じたと考えられる．

次に，高度変化量 10 mm について，SNR = 25 dB の場合の推定結果を図 4.17 に，同推定結果のヒストグラムを図 4.18 に示す．これらの結果については，先程の $\Delta z_{\text{true}} = 5\text{mm}$ の場合と同様の特徴が見られる．ただし，高度変化量が増大したことにより，全体的に推定精度の劣化が見られる．また，各 SNR に対するアンビギュイティ除去確率を図 4.19 に，誤差中央値を図 4.20 に，誤差四分位範囲を図 4.21 に示す．これらの図より，いずれの SNR においても提案法が最も高精度な推定を実現することが確認できる．また， $\Delta z_{\text{true}} = 5\text{mm}$ の場合と比較すると，提案法の優位性がより大きくなっていることが確認できる．

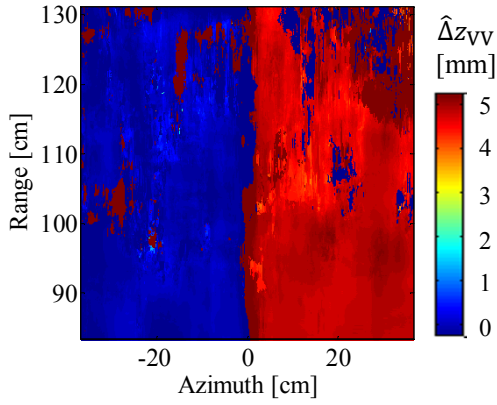
次に，高度変化量 20 mm について，SNR = 25 dB の場合の推定結果を図 4.22 に，同推定結果のヒストグラムを図 4.23 に示す．図 4.23 の変化領域のヒストグラムにおいて，誤差部分の推定値が周期的な値に収束していることが確認できる．これは評価関数の最適化において，雑音の影響により，最適解が周期的に発生する極小値 (図 4.6 参照) の一つに誤って収束した場合の推定値，すなわちアンビギュイティ誤差を表す．各手法の推定結果を比較すると，提案法におけるアンビギュイティ誤差部分が最も少ないことが確認できる．最後に，各 SNR に対するアンビギュイティ除去確率を図 4.24 に，誤差中央値を図 4.25 に，誤差四分位範囲を図 4.26 に示す．これらの図より，いずれの SNR においても提案法の推定精度が最も良好であることを確認できる．



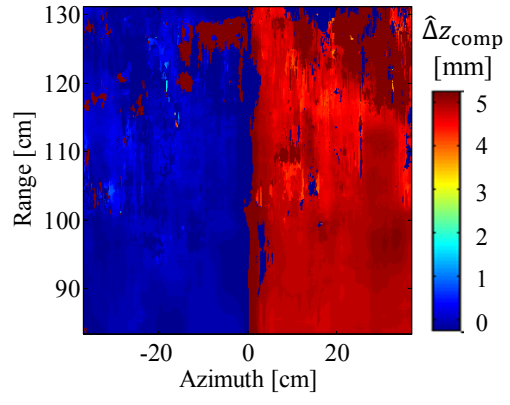
(a) HH 偏波



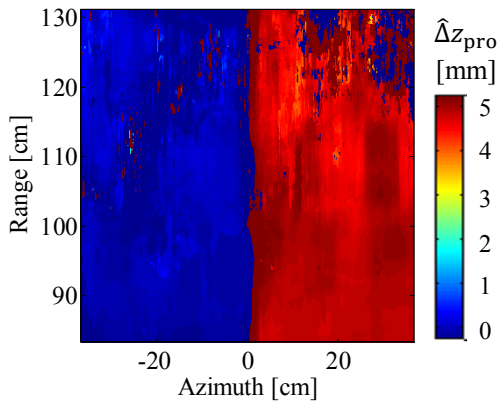
(b) HV 偏波



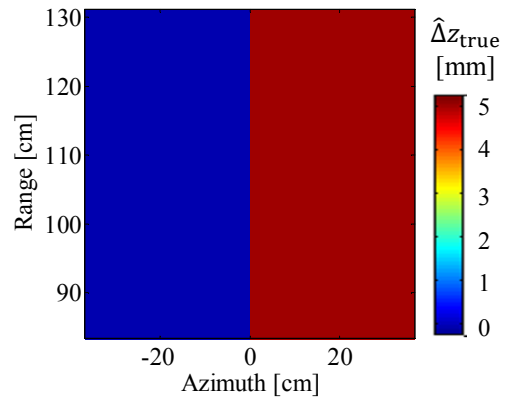
(c) VV 偏波



(d) 比較用手法

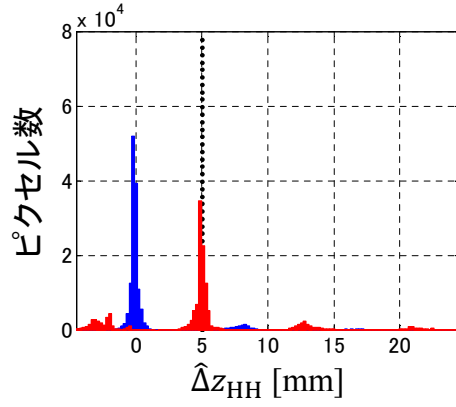


(e) 提案法

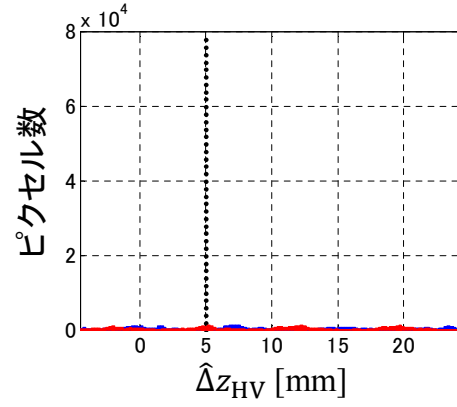


(f) 変化量真値

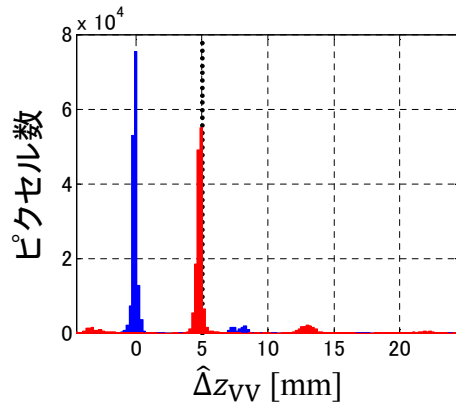
図 4.12: 高度変化量推定結果 ($\Delta z_{\text{true}}=5\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)



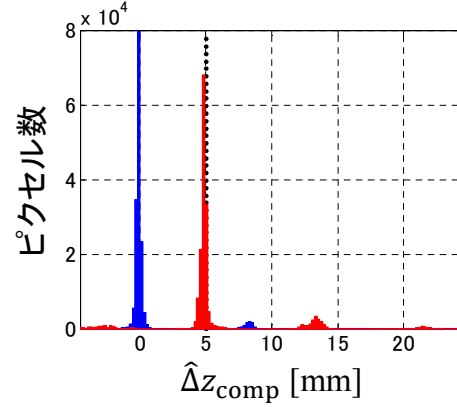
(a) HH 偏波



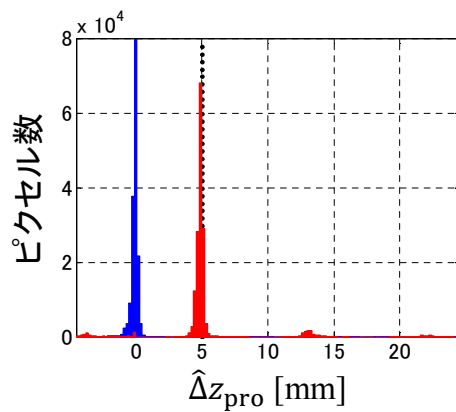
(b) HV 偏波



(c) VV 偏波



(d) 比較用手法



(e) 提案法



図 4.13: 高度変化量ヒストグラム ($\Delta z_{\text{true}}=5\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)

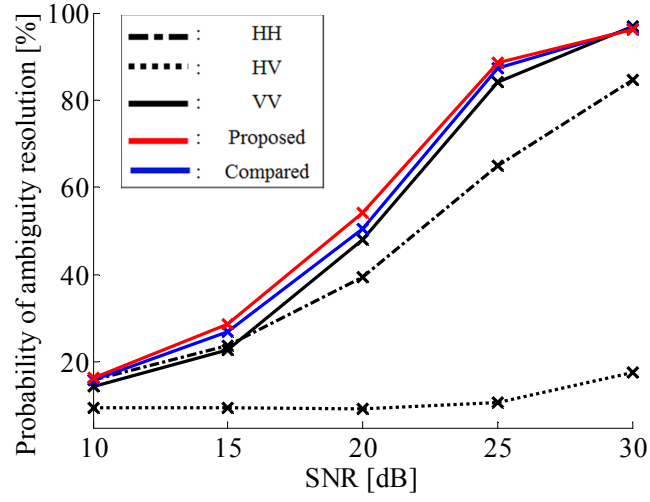


図 4.14: アンビギュイティ除去確率 ($\Delta z_{true} = 5$ mm)

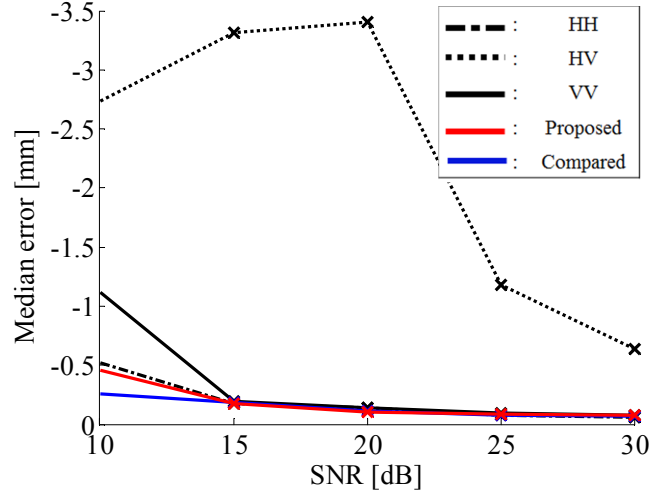


図 4.15: 誤差中央値 ($\Delta z_{true} = 5$ mm)

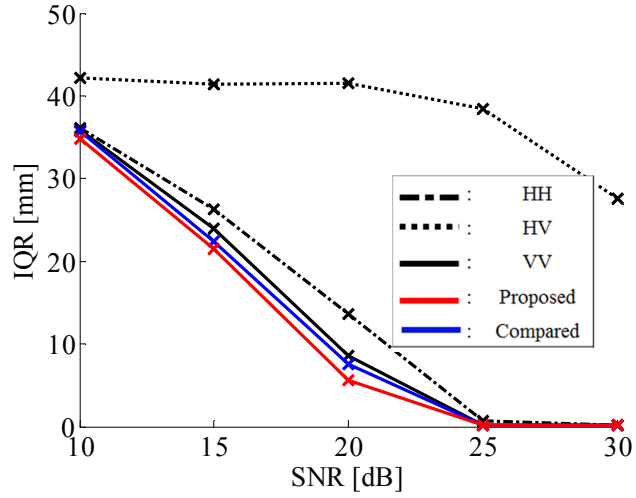
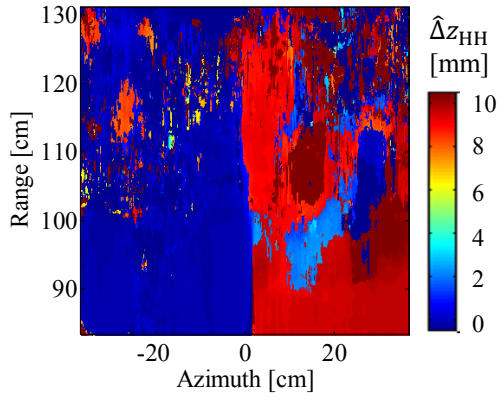
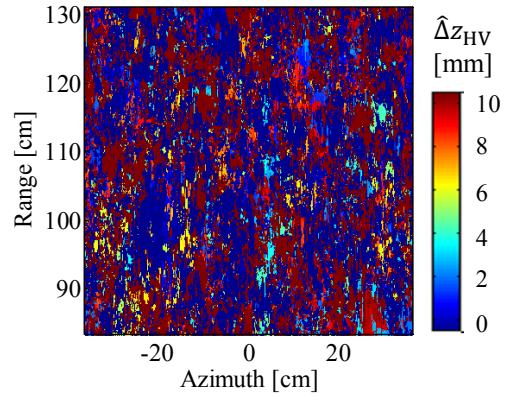


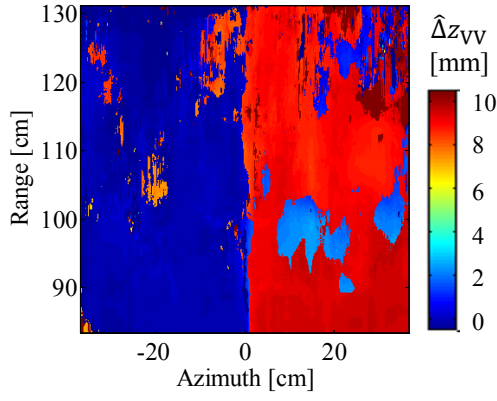
図 4.16: 誤差四分位範囲 ($\Delta z_{true} = 5$ mm)



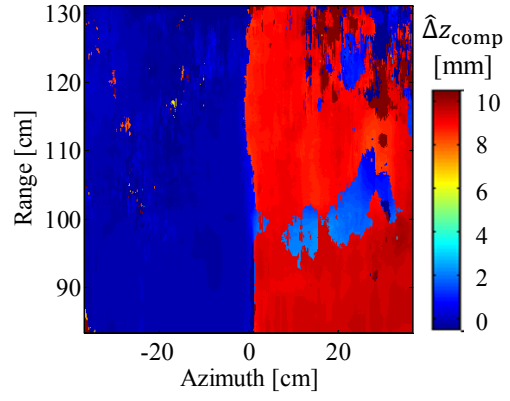
(a) HH 偏波



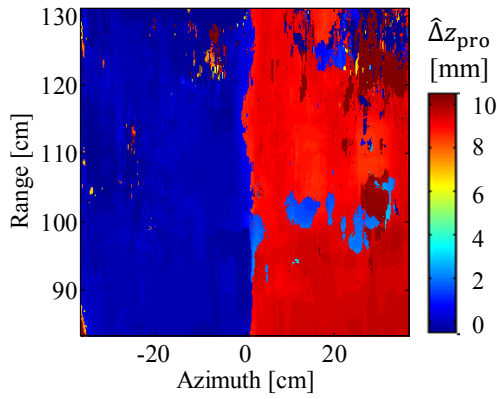
(b) HV 偏波



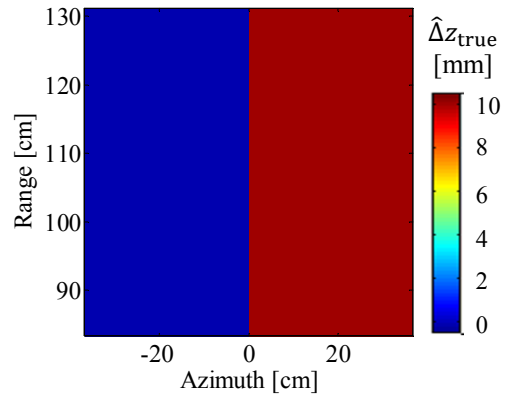
(c) VV 偏波



(d) 比較用手法

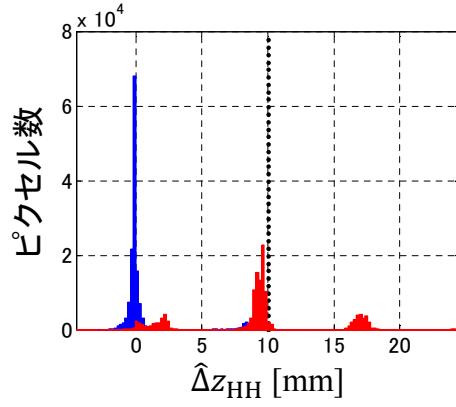


(e) 提案法

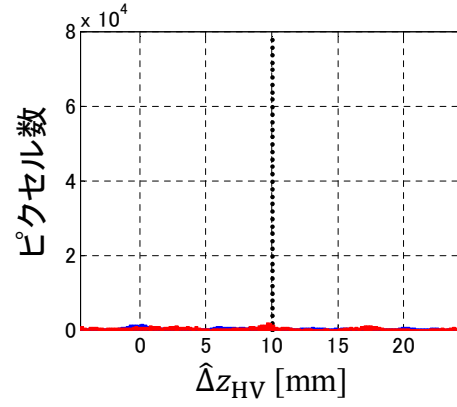


(f) 変化量真値

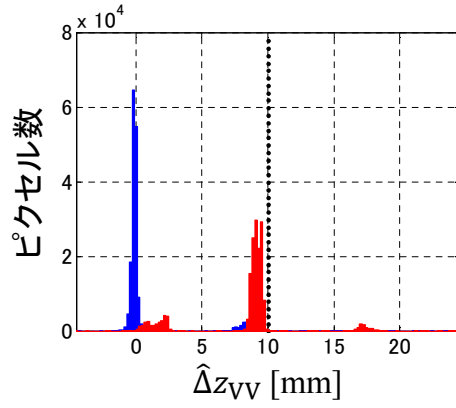
図 4.17: 高度変化量推定結果 ($\Delta z_{\text{true}}=10\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)



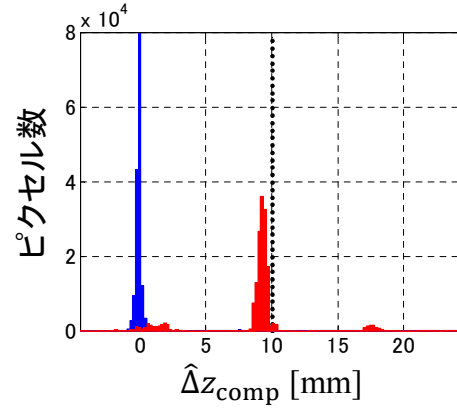
(a) HH 偏波



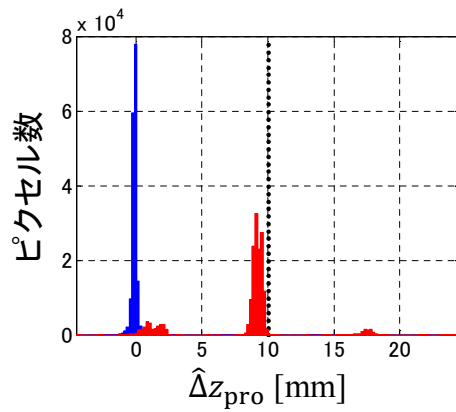
(b) HV 偏波



(c) VV 偏波



(d) 比較用手法



(e) 提案法



図 4.18: 高度変化量ヒストグラム ($\Delta z_{true}=10\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)

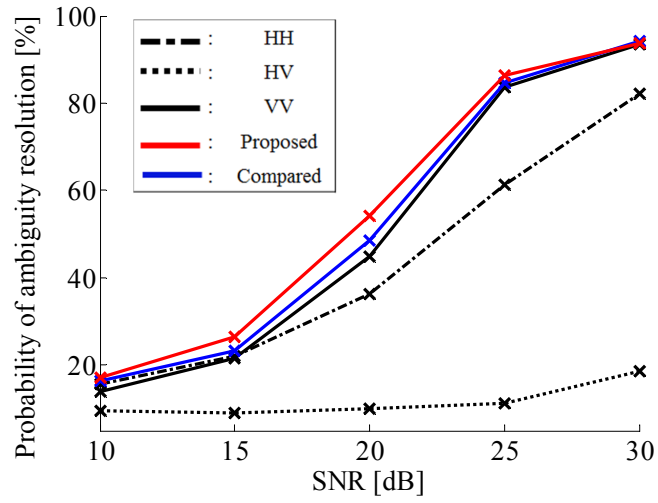


図 4.19: アンビギュイティ除去確率 ($\Delta z_{true} = 10$ mm)

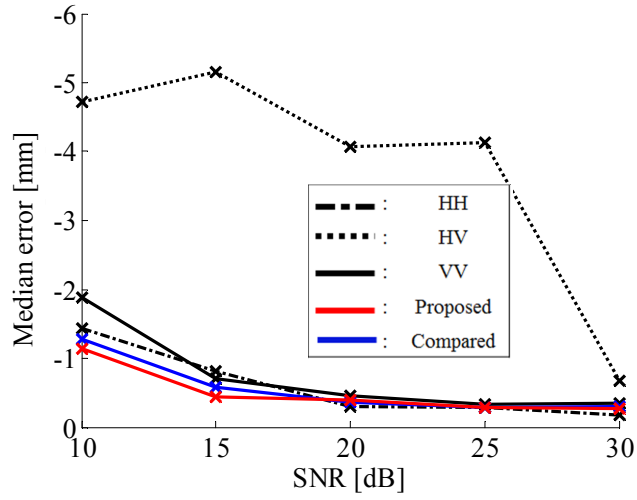


図 4.20: 誤差中央値 ($\Delta z_{true} = 10$ mm)

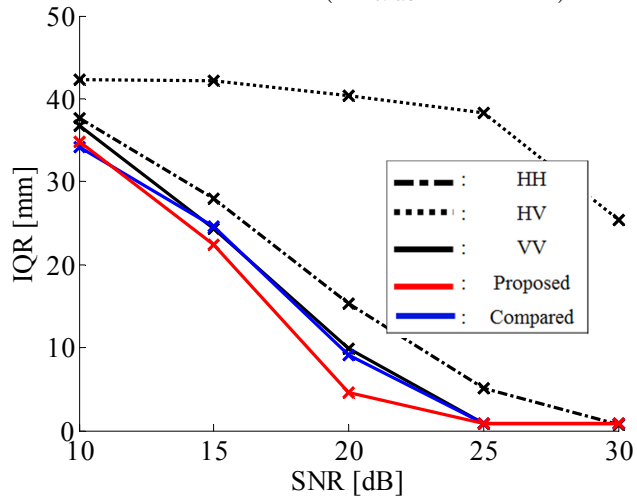
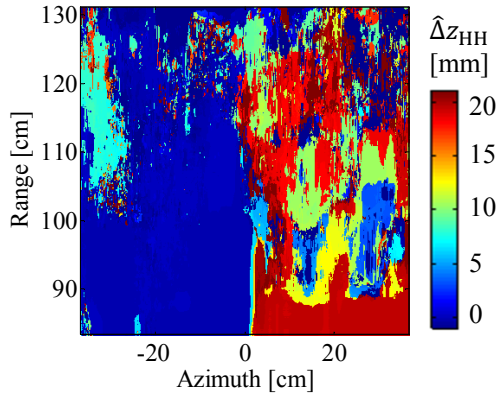
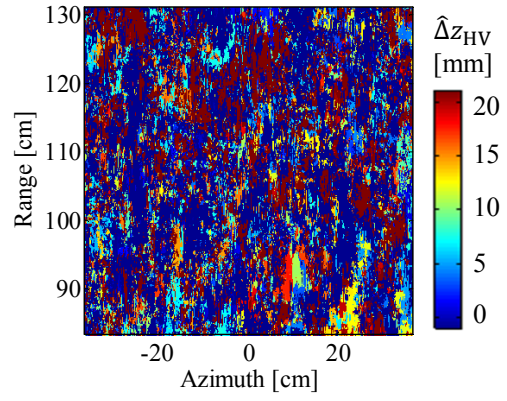


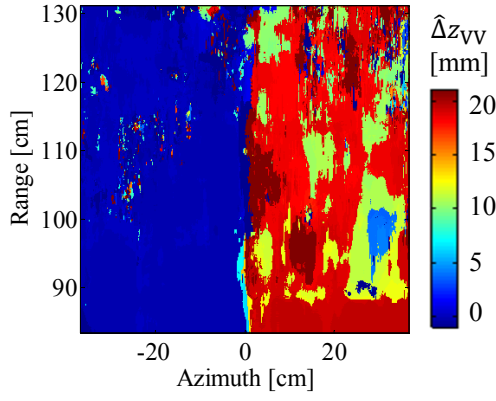
図 4.21: 誤差四分位範囲 ($\Delta z_{true} = 10$ mm)



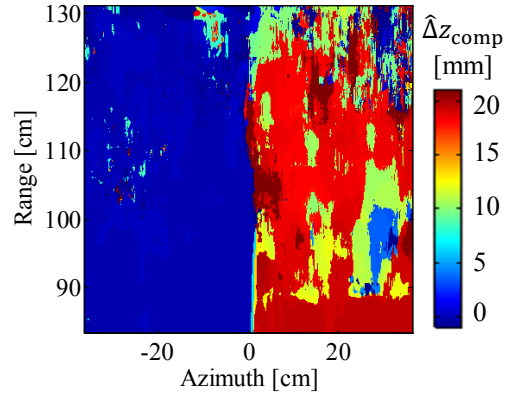
(a) HH 偏波



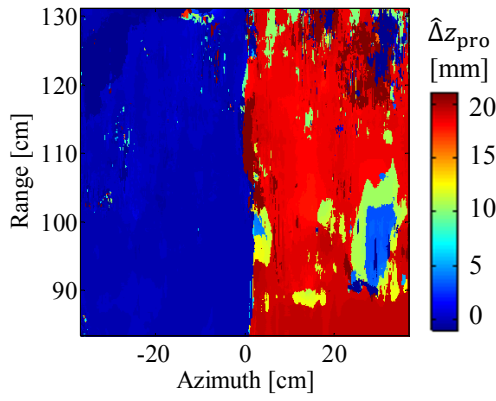
(b) HV 偏波



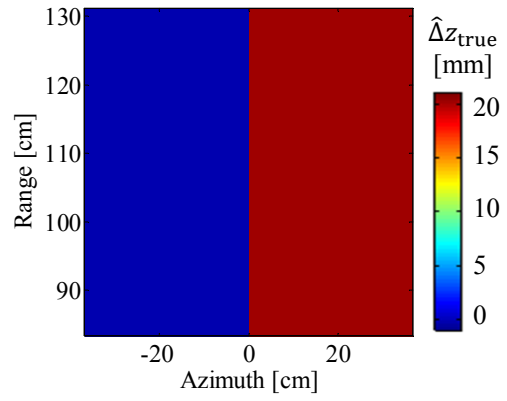
(c) VV 偏波



(d) 比較用手法

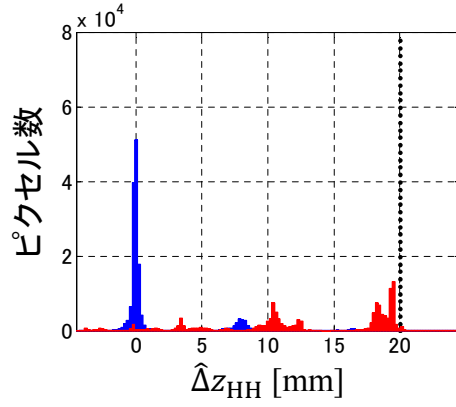


(e) 提案法

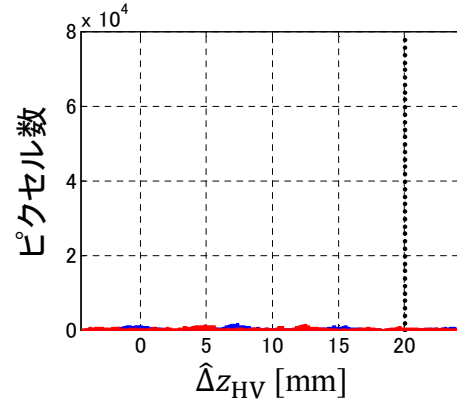


(f) 変化量真値

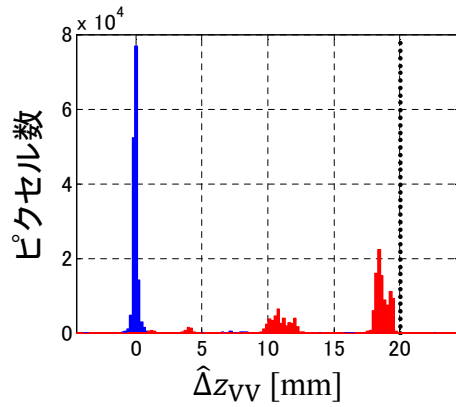
図 4.22: 高度変化量推定結果 ($\Delta z_{\text{true}}=20\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)



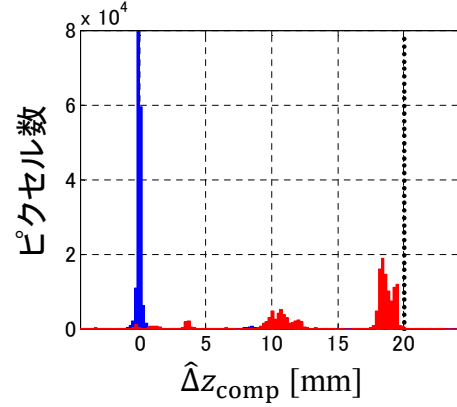
(a) HH 偏波



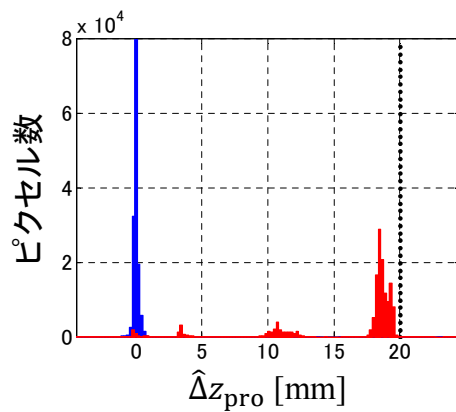
(b) HV 偏波



(c) VV 偏波



(d) 比較用手法



(e) 提案法



図 4.23: 高度変化量ヒストグラム ($\Delta z_{\text{true}}=20\text{mm}$, $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$)

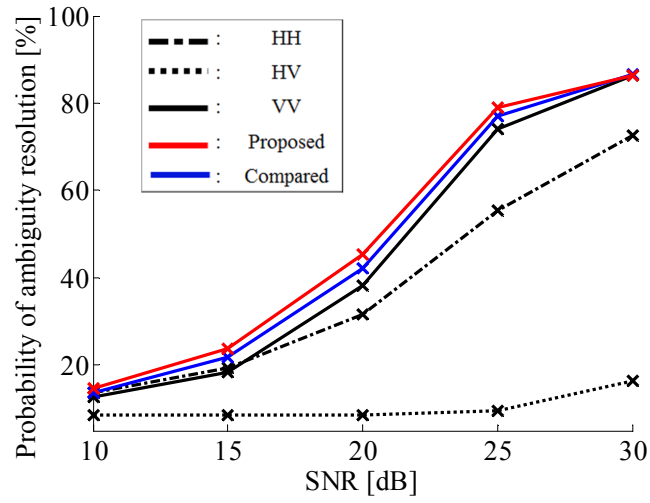


図 4.24: アンビギュイティ除去確率 ($\Delta z_{true} = 20$ mm)

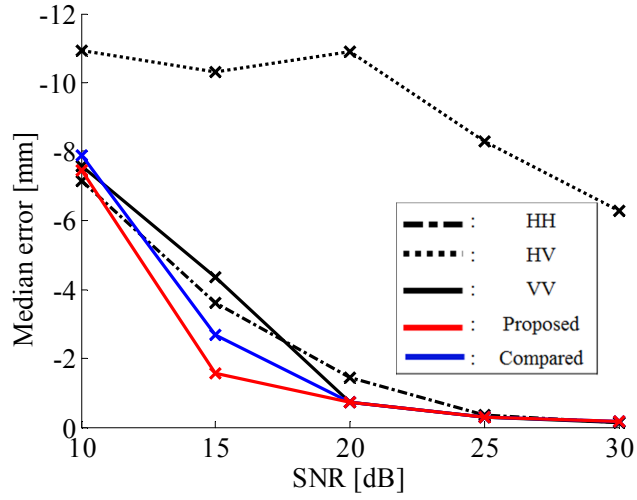


図 4.25: 誤差中央値 ($\Delta z_{true} = 20$ mm)

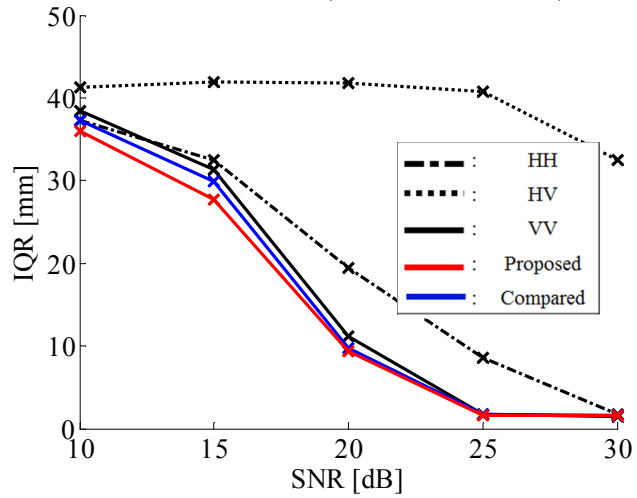


図 4.26: 誤差四分位範囲 ($\Delta z_{true} = 20$ mm)

第5章 結論

本論文では多偏波 SAR 画像のパウリ分解と重み付けに基づく変化検出指標を提案した。従来の多偏波 SAR 画像を用いた変化検出法として、正準相関分析に基づく変化検出法が提案されているが、同手法は各偏波を等価に評価するため、低 SNR 環境化において検出性能が劣化する。同問題を解決するため、本論文では PolSAR 画像のパウリ分解と SNR による重み付合成に基づく変化検出指標を提案した。SNR に基づく重み付けにより、地表面の散乱特性を考慮した変化検出が実現される。実験データによる性能評価により、3 種類の雑音環境下において、従来の手法よりも提案法の検出確率が優れることを示した。

さらに、本論文ではパウリ分解した帯域分割 SAR 画像からコヒーレンス関数を計算し、その位相情報を用いて高度変化量を推定する手法を提案した。従来の高度変化量推定法は、受信信号の周波数帯域を分割してコヒーレンス関数を計算し、高度変化量推定におけるアンビギュイティの除去と高精度な高度変化推定を同時に実現した。しかし、同手法は単一の偏波成分のみを扱っていたため、本論文では、PolSAR 画像のパウリ分解及び帯域分割処理を用いた高度変化推定法へと拡張した。提案法では、目標形状に特徴的なパウリ成分を評価するため、より高精度な高度変化推定量を実現した。また、高度変化量推定の前処理に用いられていた従来の位置合わせ手法は、高度変化が SAR 画像中の一部でのみ発生する場合、ずれの推定が不可能であった。そこで、局所的空間相関に基づく位置合わせ手法についても提案した。実験データによる性能評価により、高度変化量、SNR によらず、従来の手法よりも提案法の推定精度 (アンビギュイティ除去確率、誤差中央値、誤差四分位範囲) が優れることを示した。

今後の課題としては、様々な目標形状における両提案法の有効性の評価などが挙げられる。

参考文献

- [1] 大内和夫, “リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎,” 東京電機大学出版局, 第2版, 2009.
- [2] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, and R. M. Goldstein, “Synthetic aperture radar interferometry”, *Proc. IEEE*, vol.88, no.3, pp.333-382, Mar. 2000
- [3] R. E. Carande, “Dual Baseline and Frequency Along-Track Interferometry”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Symp, IGASS'92* vol.2., pp.1585-1588, Apr 1992.
- [4] R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel and P. W. Vachon, “Coherence estimation for SAR imagery,” *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sensing*, vol.37, no.1, pp.135-149, Jan. 1999.
- [5] T. Hoshino, S. Kidera and T. Kirimoto, “Coherent change detection with complex logarithm transformation on SAR imagery,” *Proc. IEEE SICE Annual Conf.*, pp.286-290, Aug. 2010.
- [6] Y. Yamaguchi, “Disaster Monitoring by Fully Polarimetric SAR Data Acquired With ALOS-PALSAR,” *Proc. OF THE IEEE* Vol.100 No.10, pp.2851-2860 Oct, 2012.
- [7] T. Moriyama, S. Uratsuka, T. Umehara, M. Satake, A. Nadai, H. Maeno, K. Nakamura, Y. Yamaguchi, “A Study on Extraction of Urban Areas from Polarimetric Synthetic Aperture Radar image,” *Geosci. & Remote Sensing IGARSS '04 Proc* vol.1, pp.703-706, Sep, 2004.
- [8] R. Sharma, “Coherent Change Detection Statistics for Multiple Polarization SAR Images”, *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Forty – First Asilomar Conference on* 4-7 Nov, 2007.
- [9] R. Nakamata, R. Oyama, S. Kidera and T. Kirimoto, “Accurate Height Change Estimation Method Using Phase Interferometry of Multiple Band-Divided SAR Images,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 6, pp. 1205-1214, Jun, 2014.
- [10] 山口芳雄 “レーダポラリメトリの基礎と応用 偏波を用いたレーダリモートセンシング”, 電子情報通信学会, 2007.

- [11] X. mu, W. Xue-song, X. Shun-ping and L. Yang, "Man-made target discrimination based on scattering mechanism identification and spectral correlation property analysis of POLSAR images," *Conf. Proc. IEEE APSAR2007.*, pp.484-488, Huangshan, China, Nov. 2007.
- [12] 石塚直樹, "水稻作付面積計測への合成開口レーダ (SAR) の利用," 農業環境技術研究所報告, vol.24, pp.95-151, Mar., 2006.
- [13] H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Trans.Geosci.&Remote Sensing*, vol.30, no.5, pp.950-959, Sep. 1992.
- [14] L. M. Novak, "Coherent Change Detection for Multi-Polarization SAR", *Proceedings 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp.568-573, 2005.
- [15] Mark Preiss, Nick J. S. Stacy, "Polarimetric SAR Coherent Change Detection", *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2008 7th, European Conference on*, June, 2008.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙の中にも関わらず，多大なるご指導を賜りました桐本哲郎教授に深く感謝致します．学外発表や論文作成などにおいて，大変に熱心な指導を頂きました木寺正平准教授に心から御礼申し上げます．事務手続き等を支えて頂きました猪原園子秘書に深く感謝致します．また円滑な研究室運営を実現する上で，サーバ管理などの設備管理をして頂いた大野翔平君，研究室のPCやソフトウェアの設定・管理に尽力して頂いた新實琢哉君，ホームページや研究室の安全衛生を管理して頂いた山領歩さんに感謝致します．さらに，日頃の研究室の運営だけでなく，助言などで研究の手助けを頂いた桐本研究室の皆様に感謝致します．最後に，今日まで多大な援助と心身の心配をして頂いた両親に心から感謝し，本論文の結びとさせていただきます．